INVESTIGACION y CIENCIA

NUEVOS HORMIGONES PARA OBRAS PUBLICAS

CATALISIS MOLECULAR

ENVEJECIMIENTO Y LONGEVIDAD DEL HOMBRE

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



SUPERTELESCOPIOS TERRESTRES

JUNIO 1993
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Junio de 1993 Número 201

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Joaquín Arango Vila-Belda: *Envejecimiento de la especie humana*; Monique M. Gómez: *Los supertelescopios terrestres*; Joandomènec Ros: *Audición binaural*; Ramón Pascual: *Electrodinámica cuántica en cavidades*; José Vidal Gancedo: *Catálisis en superficies*; J. M. García de la Mora: *El hombre moderno de Oriente Medio*; J. Vilardell: *Hace...*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

J. M.ª V. Martínez, Gemma Capilla, Santiago Torres y Ramón Pascual

Ciencia y empresa:

J. M.ª V. Martínez y Manuel Puigcerver

Libros:

Frederic Munné Matamala, Emilio Elizalde y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Instituto Astrofísico de Canarias

Página	Fuente
9	Dan Wagner
10-13	Ian Worpole
16-17	ESO
18-19	IAC (*recuadro*)
20-21	ESO
24	Pour la Science
25	ESO
27	Masakazu Konishi
28	Jana Brenning; Michael S. Brainard (datos para *b* y *d*) y Eric I. Knudsen, Universidad de Stanford (*fotografía recuadro*)
29	Jana Brenning
30	Jason Küffer
31-32	Jana Brenning
33	Johnny Johnson
47	Juan Vernet
48-49	Eduard Farré y Antonio Aragón
50	Juan Vernet y Antonio Aragón
52	Steve Murez/Black Star
53-58	Jared Schneidman/JSD
60-61	Visual Logic
62	Ullstein Bilderdienst, Berlín
63	Michael Goodman
64-65	Michael Goodman (*arriba*), Visual Logic (*abajo*)
66-67	Cortesía de Ofer Bar-Yosef y Bernard Vandermeersch; Ian Worpole (*mapa*)
68	Cortesía de Ofer Bar-Yosef y Bernard Vandermeersch
69	Ian Worpole
70-72	Cortesía de Ofer Bar-Yosef y Bernard Vandermeersch
74-75	Instituto Nacional de Normalización
76-77	Johnny Johnson (*izquierda*), Instituto Nacional de Normalización (*derecha*)
80-81	Neil McDonald
82	Maunsell Structural Plastics (*arriba y abajo*)
83	John James Danehy
88-91	Pour la Science



La portada muestra una maqueta del telescopio óptico-infrarrojo de 8 metros que se quisiera construir en el Observatorio del Roque de los Muchachos (isla de La Palma). De su diseño y construcción se responsabilizaría el Instituto de Astrofísica de Canarias. Tendría un espejo primario de sólo 20 a 25 centímetros de espesor, de sílice fundida, coeficiente de expansión térmica nulo y un peso de 24 toneladas. Existen varios proyectos internacionales encaminados a construir grandes telescopios basados en nuevas técnicas, pero éste sería el único enclavado en el hemisferio Norte.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
Juan Pedro Campos
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, Russell Ruthen, *Associate Editors;* Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan; Marguerite Holloway, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

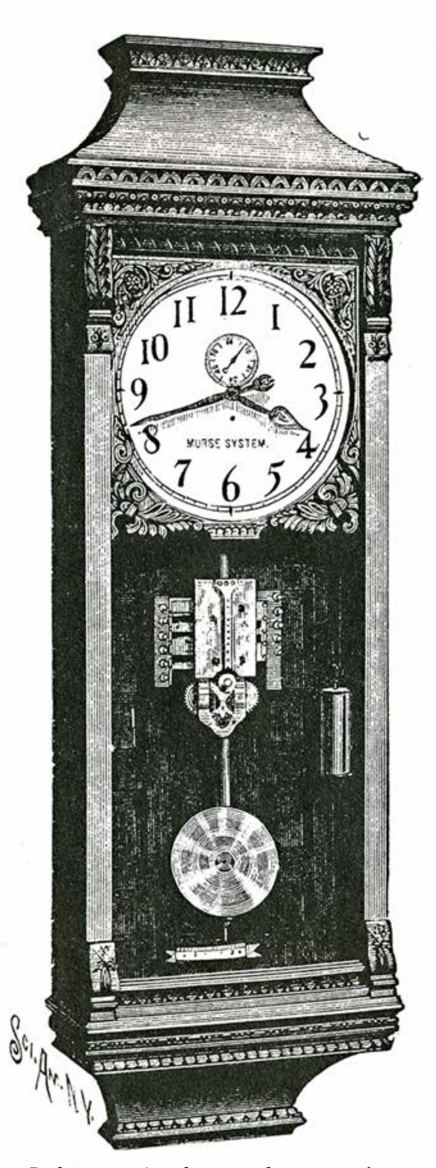
SCIENTIFIC AMERICAN: «La soldadura en atmósfera de helio facilita y pone a nuestro alcance la fusión de metales inflamables, tales como el magnesio; éste, merced a su bajísima densidad, está encontrando una aplicación creciente en la industria aeronáutica. Para conseguir el manto protector de helio, los inventores del proceso han ideado un soplete eléctrico especial, dotado de una empuñadura hueca y una boquilla por cuyo interior pasa el gas inerte. El calor específico del helio quintuplica el del aire y, cuando circula, se anticipa a la acumulación de calor en torno a la soldadura. De ese modo el proceso de soldadura se ve rodeado de una atmósfera relativamente fría, permitiendo una fusión y una penetración mejores con menor deformación que la que se consigue con otros procesos.»

«Desde hace tiempo se sabe que, si las estrellas tienen planetas girando a su alrededor, no podemos detectarlos por luz reflejada, forma en que observamos los planetas de nuestro sistema. Un planeta de diámetro doble que el de Júpiter y que distase de la estrella más próxima, Alfa Centauri, lo mismo que Júpiter del Sol aparecería a nuestra vista como una estrella de magnitud 21; es decir, apenas lo bastante brillante para fotografiarlo con un telescopio de 250 cm en las condiciones óptimas, si se mostrara en solitario sobre un firmamento oscuro. De hecho se encontraría a unos pocos segundos de arco de su estrella primaria, cuya luz, cien millones de veces más luminosa, lo ocultaría sin remedio. Hay, no obstante, otra manera en que un planeta puede revelar su presencia. Dos cuerpos describen órbitas de la misma forma pero de dimensiones distintas alrededor de su centro de gravedad común, manteniéndose en lados opuestos respecto a éste. (Ya se ha observado una pequeña oscilación de Neptuno debida a la atracción de su único satélite conocido.)»

«Cree la ciencia que la miopía es hereditaria. En una alocución dirigida a la Asociación Médica Americana, Lawrence T. Post, oftalmólogo de Saint Louis, afirmó que 'hay pocas pruebas que cuestionen que no sea sino una característica física que se transmita exactamente como cualquier otra. Una insistencia continua en la importancia de matrimonios sensatos podría dar por resultado su disminución hasta, andando el tiempo, su desaparición total. Aunque sea imposible preconizar al máximo las uniones eugenésicas, podría al menos ser viable impedir el matrimonio de dos personas afectadas de miopía extrema. No haberlo hecho así sea probablemente la causa principal de la gran incidencia de este defecto entre los alemanes de hoy'.»

... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Un caso de insólita presencia de ánimo premiada por el éxito en el uso de un antídoto contra el envenenamiento acaba de producirse en Sag Harbor. Flora Sterling, de cinco años, hija del Dr. Sterling, jugaba a la puerta de su casa cuando encontró una botella que había contenido citrato de magnesio y aún conservaba la etiqueta. La niña se la llevó a los labios y sorbió un buen trago. Lanzando un grito, dejó caer la botella y comenzó a asirse el cuello atenazada de dolor. El padre, que había oído los gritos, descubrió que lo que la pequeña había tomado por citrato de magnesio era ácido oxálico. Comprendiendo que no había un instante que perder, miró en torno en busca de un antídoto alcalino. Echando mano a su cortaplumas, se precipitó sobre la pared encalada y rascó un poco de cal recogiéndola en su mano. La echó en un vaso lleno en parte de agua y vertió la mezcla por la garganta de la casi agonizante criatura. El antídoto surtió efecto al momento.»



Reloj patrón de cuerda automática

«El nueve de marzo, el profesor Dewar comunicaba a la Regia Sociedad Londinense haber logrado congelar aire, obteniendo un sólido claro y transparente. La naturaleza exacta de este sólido es por ahora incierta y sólo podrá establecerse a través de investigaciones ulteriores. La duda tiene que ver con el anterior fracaso de Dewar, quien, pese a todos sus esfuerzos, no ha sido capaz de solidificar el oxígeno puro. El nitrógeno, por otra parte, puede congelarse con relativa facilidad. La cuestión se centra en averiguar si el frío producido es lo bastante intenso para solidificar el oxígeno, si su mezcla con el oxígeno eleva su punto de solidificación o si no se congela, sino que queda entremezclado con las partículas de nitrógeno sólido del mismo modo que el agua de rosas en la crema para el cutis. —*London Times*.»

«Uno de los sistemas más satisfactorios ideados para mantener una hora uniforme en los departamentos de una empresa grande es el perfeccionado por la "American Watchman's Time Detector Company", de Nueva York. El sistema comprende un regulador de cuerda automática, que se instala en la oficina principal o en otro lugar destacado, y un número cualquiera de esferas de reloj subsidiarias, colocadas en los departamentos y conectadas eléctricamente al regulador central. Este es de cuerda eléctrica, es decir, de cuerda automática.»

Envejecimiento de la especie humana

Nuestra especie ha modificado las fuerzas evolutivas que habían siempre limitado la esperanza de vida. En consecuencia, los poderes públicos deben prepararse para atender las necesidades de una población que pronto será mucho más vieja

S. Jay Olshansky, Bruce A. Carnes y Christine K. Cassel

La humanidad en su conjunto está envejeciendo. El envejecimiento demográfico comenzó a principios de siglo, con las mejoras registradas en la supervivencia de recién nacidos, niños y mujeres en edad reproductiva. Y concluirá a mediados del siglo próximo, cuando la composición por edades de la población se estabilice y nos acerquemos a los límites reales de la longevidad humana. Ninguna otra especie ha ejercido nunca tal control sobre las presiones de selección evolutiva que actúan sobre ella, ni ha tenido que hacer frente a las consecuencias resultantes.

El efecto de esta transformación demográfica se empieza a sentir. En 1900 había de diez a diecisiete millones de personas de 65 años o más, lo que suponía menos del 1 % de la población total. Para 1992 el mismo grupo de edad contaba con 342 millones de personas, equivalente al 6,2 % de la población. Para el año 2050 el número de personas de 65 años o más habrá crecido hasta 2500 millones de personas —esto es, cerca de una quinta parte de la población estimada del mundo. Si se elimina la posibilidad tanto de catástrofes que eleven las tasas de mortalidad como de enormes incrementos de las tasas de natalidad, la población alcanzará una composición por edades única en menos de 100 años.

Demógrafos, médicos y otros expertos concernidos han previsto el envejecimiento general de la especie humana desde hace varios decenios, pero su atención se ha centrado casi exclusivamente en el problema simultáneo del crecimiento explosivo de la población. Nosotros pensamos, sin embargo, que el envejecimiento pronto desplazará al crecimiento demográfico de la condición de fenómeno más importante desde el punto de vista de las políticas a seguir. En una población más envejecida, los patrones de enfermedad e incapacidad son radicalmente distintos. Muchas de nuestras instituciones económicas y sociales, concebidas para atender las necesidades de una población joven, no podrán sobrevivir sin un profundo replanteamiento. Las actitudes hacia el envejecimiento y hacia las personas mayores tendrán que ser revisadas para afrontar las demandas de una población anciana mucho más numerosa y diversa.

S. JAY OLSHANSKY, BRUCE A. CARNES y CHRISTINE K. CASSEL han trabajado largamente en el estudio de los límites superiores de la longevidad humana. Olshansky, doctor en sociología, se halla adscrito a dos centros ligados a la Universidad de Chicago, el de investigaciones demográficas y el de envejecimiento, salud y sociedad. Carnes, del Laboratorio Nacional de Argonne, se doctoró en ecología estadística por la Universidad de Kansas en 1980. Cassel, que se graduó en el hospital clínico de la Universidad de Massachusetts en Worcester, dirige el centro de la Universidad de Chicago dedicado a envejecimiento, salud y sociedad, amén de dar clases de gestión médica.

La estructura por edades es una característica de las poblaciones que refleja las tendencias históricas precedentes de las tasas de natalidad y mortalidad. Hasta hace poco, la curva de la estructura por edad se mantenía básicamente constante.

Hasta mediados del siglo XIX las tasas anuales de mortalidad eran fluctuantes, pero siempre en cotas altas, entre 30 y más de 50 fallecimientos por cada 1000 individuos. Estas tasas elevadas e inestables se debían, sobre todo, a las enfermedades infecciosas y parasitarias. Muy alto era el tributo que se cobraba la enfermedad entre los más jóvenes. A menudo, casi uno de cada tres niños nacidos en cualquier año moría antes de su primer cumpleaños; y en determinados subgrupos morían hasta la mitad. Dado que los alumbramientos resultaban muy peligrosos, la mortalidad entre las parturientas era también alta. Sólo un pequeño segmento de la población vivió alguna vez lo bastante como para afrontar los decrementos fisiológicos y las enfermedades que acompañan a la edad avanzada.

La única razón por la que el *Homo sapiens* consiguió superar tan temprana y terrible barrera fue el hecho de que el número de nacimientos compensara con creces el de fallecimientos. Para las mujeres era normal dar a luz siete o más hijos en el curso de una vida. Las altas tasas de fecundidad eran parte de un exitoso patrón de supervivencia que reflejaba una serie de favorables adaptaciones evolutivas conseguidas por los humanos.

La combinación de limitaciones y de adaptaciones evolutivas resultó, en el largo plazo, en una tasa de crecimiento media que, por lo menos hasta mediados del siglo XIX, se situaba justo por encima de cero. La estructura por edad de la población tenía la forma de una pirámide cuya ancha base estaba constituida por un gran número de niños pequeños. En el vértice se encontraban las pocas personas que vivían más allá del período reproductivo de su vida adulta. La edad media de la población era baja.

De entonces acá, las cosas han cambiado mucho. Durante el siglo XX, la disparidad entre altas tasas de fecundidad y bajas tasas de mortalidad condujo a tasas de crecimiento del orden de 2 o 3 por ciento, y a tiempos de duplicación del tamaño de la población de sólo unos 25 años. En



1. LA POBLACION ENVEJECIDA DE MAÑANA se halla hoy en edad escolar. Por primera vez, una gran parte de la población vive hasta edades muy avanzadas. Este cambio demográfico entraña riesgos potenciales. Que los años adicionales de vida que puede alcanzar la población sean saludables y prósperos dependerá entre otras cosas de reformas en las políticas sociales y del avance en la investigación biológica.

los Estados Unidos de hoy, las personas de 65 años y más constituyen el 12,5 por ciento de la población. Para el año 2050 representarán del 20 % al 25 %. Este cambio es el resultado del declive de la mortalidad durante las etapas tempranas e intermedias de la vida. Inicialmente fue producido por mejoras en sanidad e higiene y más tarde reforzado por otras medidas de salud pública y por intervenciones médicas. Todas sumadas impusieron su control sobre las tasas de mortalidad que derivaban de las enfermedades infecciosas y parasitarias y sobre la mortalidad maternal.

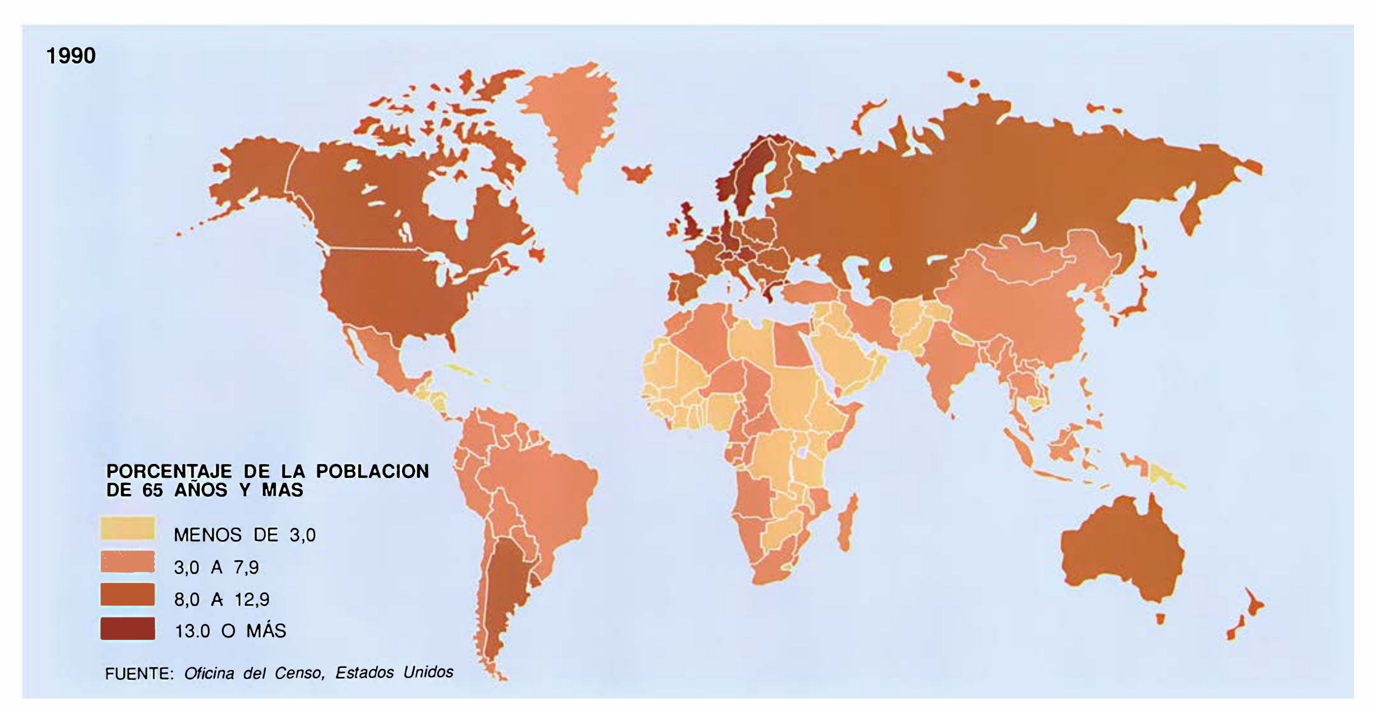
Las series de pasos por las que una población envejece han recibido la atención de los investigadores. Las pautas de dicha transformación demográfica y la velocidad con la que se produce son capitales para comprender los problemas sociales que tenemos en el horizonte.

En un primer momento, los descensos de la mortalidad perinatal, infantil y maternal hacen a la población más joven, al expandir la base de la pirámide de edades. Sin embargo, esta mejora en la supervivencia, junto con el desarrollo económico y social, conduce a un declive de las tasas de fecundidad y al comienzo del envejecimiento de la población. Una disminución del número de nacimientos produce un estrechamiento de la base de la pirámide y un aumento relativo del número de personas mayores.

A medida que disminuyen los riesgos de muerte derivados de enfermedades infecciosas y parasitarias, cobran importancia las enfermedades degenerativas asociadas con el envejecimiento: cardiopatías, accidentes cerebrovasculares y cáncer. Mientras las enfermedades infecciosas y parasitarias se producen en epidemias cíclicas, las relacionadas con la edad son estables y crónicas. En consecuencia, las tasas de mortalidad anuales caen desde niveles altos e inestables hasta niveles bajos y estables de 8 a 10 por mil. Abdel R. Omran describió este cambio como una "transición epidemiológica". La tasa de cambio y las causas subyacentes de la transición difieren entre distintos subgrupos de la población.

En los últimos estadios de la transición epidemiológica, la mortalidad en edades avanzadas disminuye conforme la medicina y la salud pública posponen la edad a la cual las enfermedades degenerativas tienden a producir la muerte. Así, las enfermedades coronarias, los accidentes cerebrovasculares y el cáncer siguen siendo las principales causas de muerte, pero ello no impide que modos de vida más saludables e intervenciones terapéuticas permitan a las personas que los padecen vivir más años. También es posible retrasar el inicio de la enfermedad y su avance.

Cuando las tasas de fecundidad y mortalidad han estado en equilibrio,



2. EL ENVEJECIMIENTO de la poblacion mundial se hará mucho más evidente en el curso del siglo XXI. En los países industrializados las tendencias ya son muy acusadas. En unos pocos decenios, el envejecimiento también afectará, de forma espectacu-

en niveles bajos, a lo largo de la duración media de una vida —de 85 a 100 años—, la estructura por edad deviene casi permanentemente rectilínea: las diferencias en el número de personas a las diferentes edades casi desaparecen. A partir de ese momento, más del 90 por ciento de las personas nacidas en un año dado vivirán más allá de la edad de 65 años. Unos dos tercios de la población podrían cumplir los 85 años, después de lo cual las tasas de mortalidad se mantendrían altas y los sobrevivientes morirían en poco tiempo. Tales estructuras por edad han sido observadas en ratas de laboratorio y otros animales criados en ambientes controlados.

Un rasgo crucial de la estructura rectilínea por edades es el de su estabilidad. Si las tasas de fecundidad se elevan, y amplían un tiempo la base de dicha estructura, su forma rectilínea irá reafirmándose gradualmente porque casi todos los miembros de la abultada cohorte sobrevivirán hasta edades avanzadas. A la inversa, si cae la tasa de fecundidad, el envejecimiento de la población se acelerará por un tiempo, porque los jóvenes se harán proporcionalmente menos numerosos. La estructura por edades rectilínea persistirá mientras la mortalidad de las edades tempranas e intermedias permanezca baja.

La tendencia hacia tasas de mortalidad bajas y estables ya ha sido observada en un segmento sustancial de la población del mundo. No obstante, ninguna nación ha alcanzado todavía una estructura de edad rectilínea del todo. Suecia y Suiza se encuentran mucho más avanzados que otros países desarrollados en el proceso de transformación demográfica que lleva al equilibrio de la población.

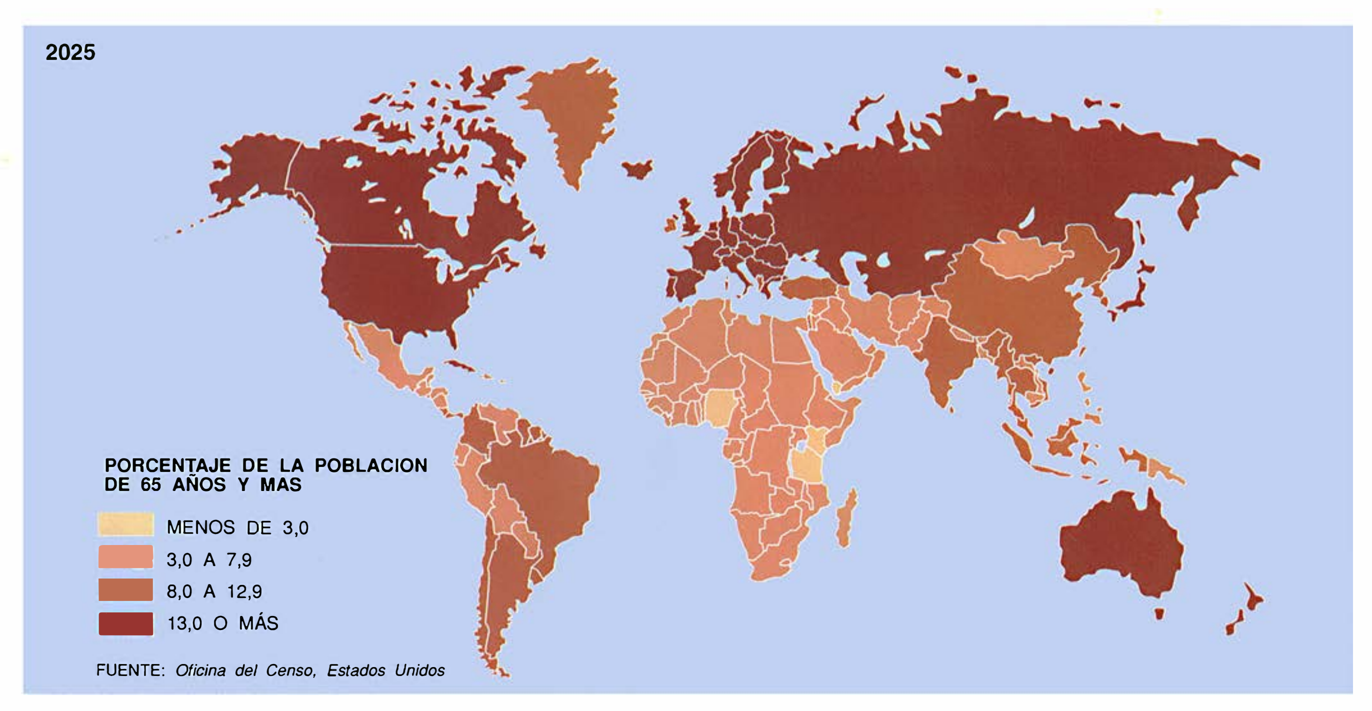
En los países desarrollados, dos fenómenos de importancia han tenido una influencia notable sobre la transformación de la estructura por edad. El primero es la explosión de nacimientos (el "baby boom") que siguió a la segunda guerra mundial. Aunque cien años suele ser intervalo suficiente para que una estructura por edad devenga estable, las altas tasas de fecundidad de la mencionada eclosión pospusieron el envejecimiento de la población, al ampliar de nuevo la base de la estructura por edad. Sin embargo, a medida que los hijos del "baby boom" envejezcan, la edad media de la población aumentará mucho más deprisa. El proceso de estabilización durará probablemente cerca de 150 años para los países desarrollados, y en ellos las estructuras por edad rectilíneas deberían ser moneda común para el año 2050.

El segundo factor que influyó en el envejecimiento en los países desarrollados fue el inesperado declive de la mortalidad en edades avanzadas que comenzó a finales de los sesenta. Pocos científicos habían previsto que las tasas de mortalidad derivadas de enfermedades vasculares pudieran reducirse a edades avanzadas. Una caída de la mortalidad a edades avanzadas acelera el envejecimiento de la población, al elevar la edad a la cual la muerte se hace más frecuente y la estructura por edad comienza a estrecharse. En algunas poblaciones, la muerte se ha convertido en un acontecimiento que se produce casi exclusivamente a edades avanzadas.

En muchos países en vías de desarrollo, y en algunos grupos en el seno de los avanzados, las poblaciones todavía tienen que hacer frente a intensas presiones de selección. No es probable, pues, que algunos países en desarrollo alcancen la situación de equilibrio ni siquiera para mediados del siglo XXI. No obstante, el ritmo al que la población envejece se acelerará a lo largo y ancho del mundo subdesarrollado durante los próximos sesenta años.

En China, país que tiene la mayor población y el mayor número de personas de edad, la población de 65 años y más aumentará del 6,4 por cien (71 millones de personas) a cerca del 20 por cien (270 millones de personas) para el año 2050. India, cuya población anciana es la segunda más grande del mundo, debería experimentar crecimientos proporcionales incluso mayores.

Hay que subrayar que el impulso demográfico del crecimiento, así como el del envejecimiento, ya está inscrito en las estructuras por edad de todos los países: como es obvio, los individuos que se harán viejos en



lar, a gran parte de la población de los países en vías de desarrollo. La principal causa de esta transformación demográfica estriba en la disminución de la mortalidad a edades tempranas, gracias a la medicina preventiva.

el próximo medio siglo ya han nacido. Estas fuerzas demográficas traerán consigo, en las próximas décadas, un formidable repertorio de problemas sociales, económicos y de salud, muchos de los cuales aún no han sido previstos por los poderes públicos y desbordan la capacidad de los países en vías de desarrollo para hacerles frente.

Para mediados del siglo XXI, gran parte de la humanidad debería haber terminado ya su transformación en una población envejecida. Nadie sabe todavía si después de esas fechas la medicina conseguirá posponer la edad a la que la tasa de mortalidad comienza a aumentar rápidamente. ¿Mantendrá su forma el vértice de la distribución por edad, pero deslizándose hacia edades más avanzadas, o se comprimirá la mortalidad en un período de tiempo más corto?

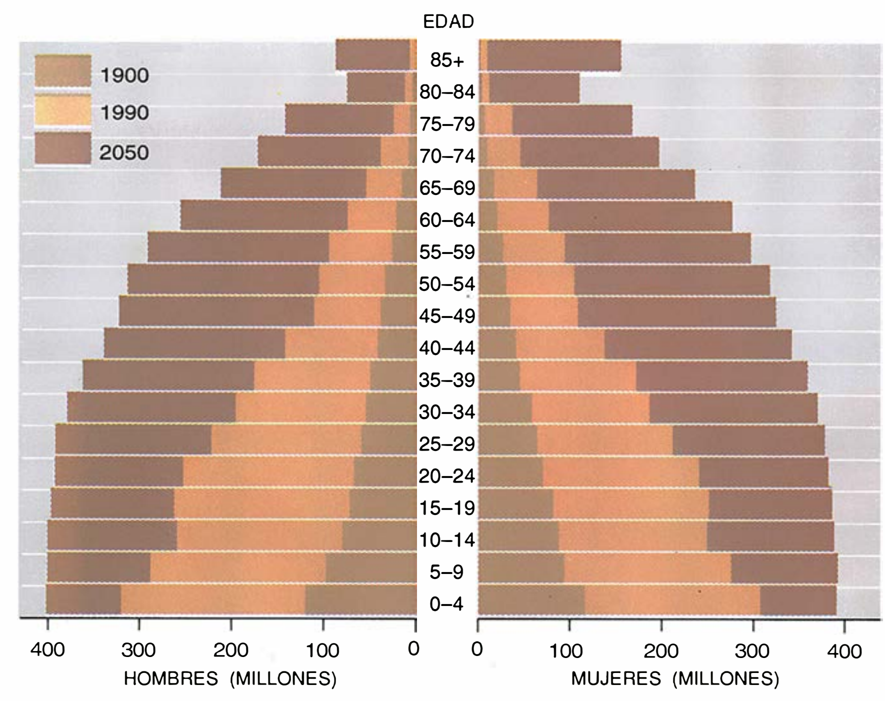
La respuesta, que podría tener una influencia profunda sobre asuntos económicos y sanitarios de primer orden, depende de si la longevidad tiene un límite superior y de si la tasa de mortalidad tiene un límite inferior.

La cuestión de hasta dónde pueden descender las tasas de mortalidad ha intrigado a los investigadores durante decenios. En 1978, el demógrafo francés Jean Bourgeois-Pichat calculó que la esperanza media de vida humana no superaría los 77 años. Llegó a esta cifra eliminando todas las muertes causadas por accidentes, homicidios, suicidios y otras causas no relacionadas con la senescencia. A continuación, calculó las tasas de mortalidad más bajas posibles para accidentes cardiovasculares, cáncer y otras enfermedades asociadas con el envejecimiento. En una palabra, eliminó todas las causas de muerte que no parecían intrínsecas a la biología humana. Sin embargo, poco después de publicarlo, el límite de esperanza de vida de Bourgeois-Pichat ya había sido superado en varios países. Otros demógrafos han especulado con la posibilidad de que la esperanza de vida se acerque pronto a los 100 años, pero para que sus estimaciones teóricas se cumplan se requieren cambios que es poco realista esperar en la conducta humana y en la mortalidad.

En 1990 nosotros abordamos la cuestión de la longevidad de una manera más práctica. Más que predecir los límites inferiores de la mortalidad, nos preguntamos qué calendarios de mortalidad, o tasas específicas de mortalidad por edad, se necesitarían para elevar la esperanza de vida desde sus actuales niveles hasta varios objetivos de edad comprendidos entre los 80 y los 120 años. Para determinar la plausibilidad de conseguir esos objetivos, procedimos a comparar esos calendarios de mortalidad con calendarios hipotéticos que reflejaban la eliminación del cáncer, de las complicaciones vasculares y de otras enfermedades mortales de primer orden. Así demostramos que, a medida que la estimación actuarial de la esperanza de vida se aproxima a los 80 años, son necesarias cada vez mayores reducciones de las tasas de mortalidad para producir aumentos siquiera sea marginales en la esperanza de vida.

Nuestra conclusión fue que la esperanza de vida al nacer ya no es un instrumento demográfico útil para detectar declives en las tasas de mortalidad en países donde dichas tasas ya son bajas. Más aún, sugerimos que, en ausencia de revoluciones científicas que modifiquen la tasa básica de envejecimiento, es improbable que la esperanza media de vida exceda de los 85 años. Como otros antes que nosotros, demostramos que las ganancias en esperanza de vida serán pequeñas, aun cuando se aceleren los descensos en las tasas de mortalidad en edades avanzadas.

¿Por qué en países de baja mortalidad la métrica de la esperanza de vida es tan insensible a los descensos en la mortalidad a edades avanzadas? Primero, pasada la edad de 30, el riesgo de muerte siempre se ha doblado cada ocho años aproximadamente, al menos desde que existen estadísticas de mortalidad fiables. Esta característica de la mortalidad humana no ha cambiado, a pesar de los rápidos descensos en tasas de mortalidad a todas las edades que se han registrado durante este siglo. Un hombre de 38 años tiene hoy una esperanza de vida mayor que uno de hace un siglo, pero sigue teniendo el doble de probabilidades de morir que uno de 30 años.



3. LA ESTRUCTURA POR EDADES de la población está experimentando cambios espectaculares. Durante los cien mil años precedentes, la estructura por edad de la población humana tenía la forma de una pirámide empinada. Desde 1900 se ha hecho más ancha y uniforme, debido a que un número relativamente mayor de individuos de una población creciente sobreviven hasta edades avanzadas. Para mediados del siglo XXI, la forma de la pirámide será casi totalmente rectangular.

Más aún, no hay indicios de que los humanos vivan mucho más allá de la edad de 110 años, con independencia de que se reduzcan las tasas de mortalidad derivadas de todas las principales enfermedades letales. En consecuencia, a medida que la muerte quede cada vez más confinada a las edades avanzadas, el descenso en las tasas de mortalidad se irá deteniendo. El punto de desaceleración se produce cuando la esperanza de vida se acerca a los 80 años.

Finalmente, en países de baja mortalidad, las enfermedades cardiovasculares y el cáncer son responsables de tres de cada cuatro muertes pasada la edad de 65 años. Puede decirse que, de hecho, estas enfermedades compiten por las vidas de los individuos, sobre todo a edades avanzadas. Si el riesgo de morir de cualquier enfermedad aisladamente considerada se redujese a cero, la población que se salvase de ella estaría sometida a mayores riesgos de mortalidad derivados de otras causas, y de ello resultaría una ganancia neta en esperanza de vida pequeñísima. Conforme las muertes se concentran en las edades más avanzadas, se agudiza la competición entre causas de mortalidad.

Sin embargo, cabe pensar que la medicina aprenda a ralentizar la propia tasa de senescencia, posponiendo de esa forma el inicio de las enfermedades degenerativas y las causas de mortalidad a edades avanzadas. En esa dirección, muchos científicos que trabajan en biología molecular y evolución se aprestan a descifrar por qué envejecen los organismos.

En un influyente trabajo escrito en 1957, George C. Williams propuso un mecanismo para explicar la evolución de la senescencia. Su teoría, así como las predicciones subsiguientes, se basaban en dos argumentos. En primer lugar, ciertos genes son pleiotrópicos, es decir, se encuentran implicados en múltiples procesos biológicos; en segundo lugar, propuso la idea de que determinados genes, que conferían ventajas en orden a la supervivencia en etapas precoces, ejercían más tarde efectos fisiológicos deletéreos. Y vinculó esas dos ideas a la noción admitida de que la eficacia evolutiva de un individuo se mide por su contribución genética a las generaciones subsiguientes.

De ahí Williams pasó a defender que las probabilidades de un individuo de reproducirse con éxito disminuirían a lo largo del tiempo, porque terminaría muriendo a causa de un accidente o por alguna otra causa incontrolable. A medida que los individuos realizan su potencial reproductivo, las presiones selectivas deberían disminuir, y cualesquiera genes que tuvieran efectos perjudiciales en etapas posteriores de la vida no podrían ser eliminados por la selección natural. Williams sostuvo que este proceso de pleiotropía antagonista aportaba una base genética para el envejecimiento.

Otra teoría, propuesta en 1977 por T. B. L. Kirkwood, constituye un caso especial de pleiotropía antagonista. Kirkwood partió del principio de que los organismos deben siempre dividir su energía fisiológica entre la reproducción sexual y el mantenimiento del soma o cuerpo. Según él, para una especie la estrategia óptima de eficacia genética supone destinar menos energía para el mantenimiento somático que la requerida para la perfecta reparación de daños y la inmortalidad. Por tanto, la senescencia es la consecuencia inevitable de la acumulación de defectos no reparados en las células y los tejidos. En términos de la teoría del soma disponible de Kirkwood, la senescencia es el precio que se paga por la reproducción sexual.

La perturbación de la regulación génica puede proporcionar un mecanismo que ligue las teorías de la pleiotropía antagonista y del soma disponible en una noción unificada de enfermedad y senescencia. Para ello se necesitan dos conceptos vertebrales del moderno paradigma de la biología molecular: regulación génica y pleiotropía. En biología molecular se acepta que los genes se hallan finamente regulados y que las proteínas producidas por la actividad de los genes están implicadas en procesos múltiples que a menudo interactúan entre sí. A lo largo del tiempo, una acumulación gradual de daños moleculares aleatorios podría perturbar la regulación normal de la actividad de los genes, con la posibilidad consiguiente de poner en marcha una cascada de consecuencias nocivas. Richard G. Cutler se ha referido a este proceso como la hipótesis disdiferenciadora del envejecimiento.

La gravedad de las consecuencias dependerá de cuán críticos sean los procesos afectados en el momento de la ruina de la regulación y de la habilidad del organismo para compensar los daños o para repararlos. Si el daño perturba la regulación del crecimiento o la diferenciación celular, podría producirse cáncer. La pleiotropía antagonista describe casos en los que la expresión temporal de un gen se desquicia. Por ejemplo, un gen que resulta esencial en etapas precoces de

la vida puede ser dañino si se expresa más tarde. La perturbación de la regulación génica y la pleiotropía también ofrecen un mecanismo biológico para la teoría del soma disponible. Podría darse envejecimiento cuando las funciones normales de reparación y mantenimiento de las células se salen de control y degradan gradualmente la función fisiológica.

Las pruebas que se van acumulando sugieren que las localizaciones de los daños moleculares quizá no sean enteramente aleatorias. Algunas regiones del genoma parecen ser inestables por naturaleza; en consecuencia, podrían ser más sensibles a la perturbación de la regulación génica. Cuando el daño se produce en células somáticas, podría resultar en enfermedad o en senescencia. Los efectos del daño infligido a las células germinales (ovocitos y espermatozoides) van desde la muerte celular a cambios genéticos que pueden transmitirse a la próxima generación. Las propensiones hacia la enfermedad y la aptitud para el mantenimiento y la reparación somáticos son probablemente rasgos heredables.

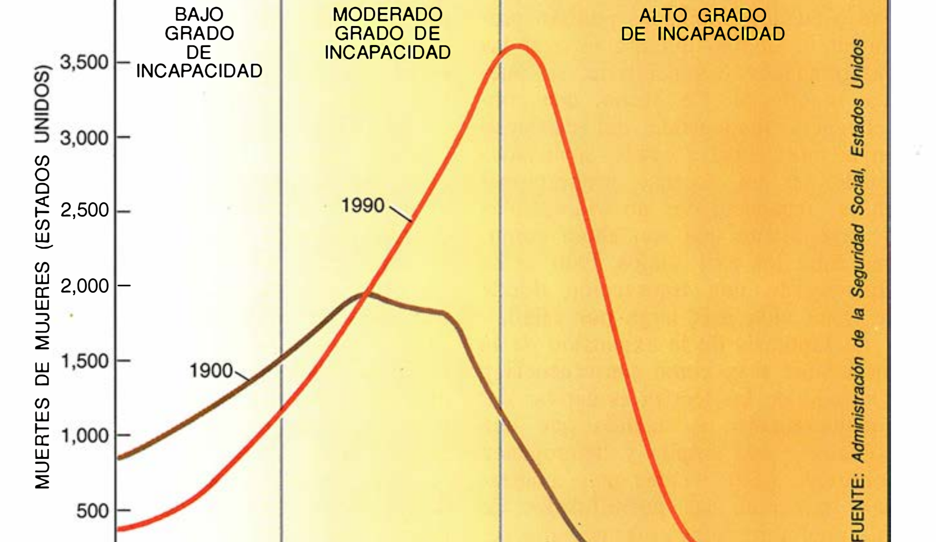
Si hay un reloj biológico que se pone en movimiento cuando un espermatocito fecunda un óvulo, no es probable que se pare en alguna fecha de muerte predeterminada que esté codificada en los genes. Antes bien, la perturbación de la regulación génica es un producto de acontecimientos aleatorios que actúan a lo largo de una vida sobre un genoma que contiene inestabilidades heredadas. Con el progreso de nuestra comprensión de los mecanismos biomoleculares, quizá podamos algún día manipular los procesos morbosos y decelerar el curso de la senescencia, prolongándose de esa forma la duración media de la vida.

De hecho se conoce un método de alargar la duración de la vida, aunque los lazos que lo ligan a los mecanismos moleculares no están claros: las restricciones dietéticas. A comienzos del siglo XX, se descubrió que las ratas de laboratorio alimentadas con una dieta baja en calorías vivían más que aquellas otras a las que se les dejaba comer a sus anchas. Hallazgos semejantes se han registrado después en diversas especies de ratas, moscas y peces. Los trabajos de los equipos encabezados por Richard Weindruch y de Roy L. Walford sugieren que la restricción dietética podría enlentecer algunos parámetros del envejecimiento en primates no humanos.

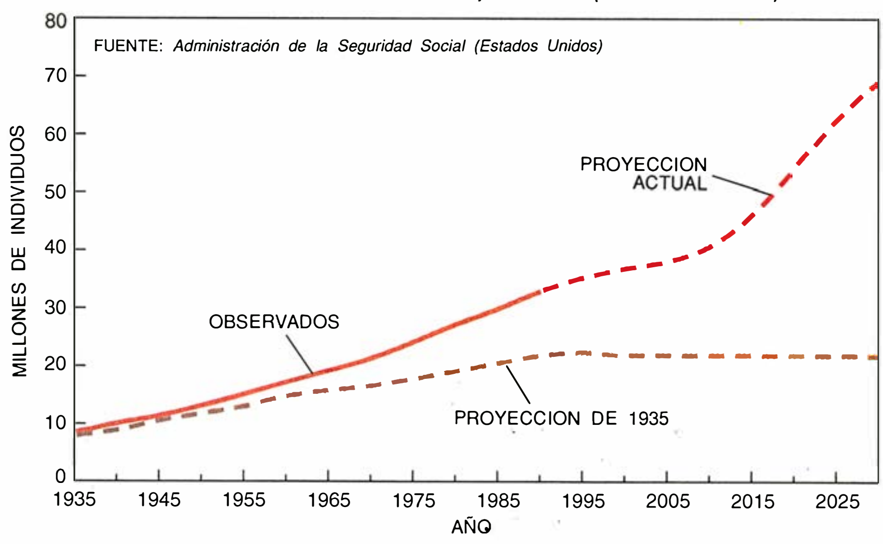
Dan a entender que se puede prolongar la duración de la vida posponiendo, sin eliminarlo, el inicio de las enfermedades mortales. Las restricciones calóricas no alteran la tasa de declive fisiológico en los animales de laboratorio, ni cambia el tiempo de duplicación de su tasa de mortalidad. Por el contrario, los animales parecen vivir más porque se retrasa la edad a la que sus tasas de mortalidad comienzan a aumentar exponencialmente. Las restricciones dietéticas parecen ayudar a preservar el mantenimiento somático durante un tiempo mayor. Aunque no es razonable esperar que haya tantas personas que adopten una dieta restringida en calorías como para que aumente la duración media de la vida humana, la ciencia podría identificar los mecanismos de los que depende y consiguientemente alargar la longevidad por otros medios.

Pocos observadores habían imaginado que la evolución demográfica de la estructura de edad humana pondría de manifiesto un nuevo conjunto de enfermedades y causas de muerte. ¿Cabe pensar que futuras reducciones en la mortalidad a edades avanzadas revelen la existencia de nuevas enfermedades senescentes? ¿O, simplemente, aumentará la prevalencia de las enfermedades senescentes que existen? Dado que la atención de las industrias de la salud se centra en reducir el impacto de las enfermedades mortales y en retrasar la muerte, estas cuestiones resultarán capitales para los poderes públicos que traten de evaluar las consecuencias, tanto médicas como económicas, de una población que envejece.

Una de las cuestiones principales es la de saber si la tendencia hacia una mortalidad que disminuye en las edades avanzadas tendrá efectos beneficiosos o perjudiciales para la salud del conjunto de la población. En un controvertido artículo publicado hace doce años, James F. Fries propuso la hipótesis de que el límite biológico de la vida humana se halla establecido en torno a los 85 años. Según él, la adopción de estilos de vida mejores y los avances en la tecnología médica no tendrán más efecto que comprimir la mortalidad, la morbilidad y la invalidez en un período de tiempo más corto próximo a ese límite. Su premisa subyacente suponía que los cambios en la dieta, en el ejercicio y en las rutinas diarias pospondrán la edad de inicio tanto de las principales enfermedades mortales (cardiopatías, cáncer y accidentes cerebrovasculares) como de las enfermedades degenerativas de la edad avanzada (entre ellas la enfermedad de Alzheimer, la osteoporosis y los deterioros sensoriales).



4. A MEDIDA QUE LA POBLACION en proceso de envejecimiento experimenta una transición epidemiológica, las pautas de mortalidad e incapacidad se desplazan. Gracias a la difusión de modos de vida más saludables y a la intervención de la medicina, en nuestros días sobrevivimos más años frente a las enfermedades del corazón, los accidentes cerebrovasculares y el cáncer. Mas, en razón de esa prolongada supervivencia, podemos padecer durante más tiempo enfermedades relacionadas con la vejez que no son mortales pero sí incapacitadoras.



5. A MEDIDA QUE LA POBLACIÓN ENVEJEZCA y aumente la esperanza de vida seguirán produciéndose tensiones en los sistemas de protección, del tipo de la Seguridad Social norteamericana y el Medicare. El número de los beneficiarios de la Seguridad Social está creciendo mucho más deprisa de lo que cabía prever cuado hace decenios se concibió por primera vez dicho sistema.

Desde entonces, la hipótesis de la compresión de la morbilidad de Fries ha sido cuestionada por quienes postulan una expansión de la morbilidad. Sostienen éstos que los factores conductuales que sabemos que reducen los riesgos derivados de las enfermedades mortales no cambian el inicio o la progresión de la mayoría de las enfermedades degenerativas asociadas con el envejecimiento. En consecuencia, más reducciones de la mortalidad a edades avanzadas podrían prolongar el tiempo durante el cual las enfermedades degenerativas se pueden manifestar. De hecho, una consecuencia inadvertida del descenso en la mortalidad a edades avanzadas puede ser un ascenso proporcional en las incapacidades no susceptibles de tratamiento que son ahora comunes entre los muy viejos. Esto se ha considerado una transacción donde se troca vida más larga por salud.

La hipótesis de la expansión de la morbilidad sirve como consecuencia y corolario de las teorías evolutivas del envejecimiento. A medida que una población más amplia y heterogénea sobrevive hasta edades más avanzadas, aumentan las posibilidades de que predominen las enfermedades senescentes conocidas y surjan otras nuevas asociadas con la edad (resultantes quizá de los efectos pleiotrópicos de la perturbación génica).

Las ramificaciones de la hipótesis de la expansión de la morbilidad son tan alarmantes que se ha formado una organización internacional de científicos, bajo la dirección del demógrafo Jean-Marie Robine, para comprobar su validez. La atención del grupo se centra en la compleja relación entre la declinante mortalidad a edades avanzadas y la duración relativa del período de la vida que se pasa en condiciones de salud o de incapacidad. El grupo ha demostrado que en las sociedades occidentales cabe esperar que las mujeres pasen hasta una cuarta parte de sus vidas incapacitadas y los hombres hasta una quinta parte. Los ricos tienen más probabilidades de vivir más tiempo y de estar en mejores condiciones de salud que los que tienen una posición menos acomodada.

Los datos disponibles sugieren también que el número medio de años que las personas pasan en condiciones de incapacidad ha aumentado recientemente más deprisa que el de los que los pasan en buena salud. En otras palabras, aunque en nuestros días se disfruta de más años sanos mientras somos jóvenes y de mediana edad, es posible que estemos pagando el precio de estas mejoras en forma de pasar más tiempo incapacitados cuando somos viejos. A causa de los conocidos problemas de fiabilidad y comparabilidad de los datos, y de la escasa duración de los períodos en que han podido ser observadas, las actuales tendencias en materia de mortalidad e incapacidad deben ser interpretadas con cautela.

El dilema al que nos enfrentamos como sociedad es que la ética obliga a los médicos y a los expertos a buscar nuevas técnicas en el esfuerzo para posponer la muerte. Sin embargo, esta campaña acelerará el envejecimiento de la población. Sin un esfuerzo paralelo para mejorar la calidad de vida, podría también aumentar la frecuencia y la duración de los estados de debilidad e incapacidad en edades avanzadas. La sociedad se verá pronto obligada a reconocer que la muerte ya no es su principal adversario. Se palpa la creciente amenaza de las enfermedades incapacitantes que acompañan a la mayoría de la gente en la edad avanzada.

Hay muchas razones que sustentan la visión optimista de que los avances en biología molecular harán posible que se modifique la duración media de la vida. Hasta qué punto se puede prolongar la duración de la vida ralentizando la tasa de senescencia es objeto de debate. Nadie ha demostrado todavía que la senescencia humana pueda ser modificada.

Tampoco está claro cómo podrían influir esos progresos científicos en la calidad de vida. Si el enlentecimiento de la tasa de senescencia retrasa todos los parámetros fisiológicos del envejecimiento, se podría prolongar la juventud y comprimir la incapacidad a un corto período de tiempo antes de la muerte. Sin embargo, si sólo algunos parámetros del envejecimiento son susceptibles de modificación, entonces los años añadidos pueden convertirse en una extensión de la vida incapacitada a edades avanzadas.

Podemos identificar algunos problemas sociales a los que tendrá que enfrentarse una población envejecida. Dos de los más difíciles serán la solidez financiera de los sistemas de pensiones o de protección social dependientes de la edad, tales como la Seguridad Social y Medicare, y la financiación de la atención sanitaria. Tanto en Estados Unidos como en otros países, los sistemas de Seguridad Social se crearon cuando las estructuras por edad eran todavía piramidales y la esperanza de vida era inferior a 60 años. Las poblaciones beneficiarias de esos programas son mucho más numerosas —y viven considerablemente más— de lo que se preveía en el momento de su iniciación. Dado que ya existe el impulso demográfico tendente a poblaciones ancianas de mayor tamaño y que viven más años, resulta inexorable que esos sistemas no puedan sobrevivir en su forma actual mucho más allá del segundo decenio del próximo siglo.

Dado que el descenso de la mortalidad permite a la mayoría de las personas sobrevivir más allá de la edad de 65 años, la seguridad social tendrá que dar cobertura a decenas de mi-

llones de personas, durante varias décadas. Algunas instituciones, así la norteamericana Medicare, contienen pocas restricciones efectivas en lo concerniente a la utilización de cuidados intensivos de alto coste, que son cruciales para el tratamiento de muchas enfermedades mortales; pero no satisfacen apenas los gastos de la atención crónica de larga duración, cuya necesidad crecerá tan deprisa como envejece la población. En consecuencia, el coste de Medicare (como el de la atención sanitaria en general) experimentará una rápida escalada, erosionando la voluntad política necesaria para impulsar reformas sistémicas que incluyan los tratamientos de larga duración. ¿Podemos seguir invirtiendo en sistemas de atención sanitaria cada vez más costosos que no están pensados para atender las demandas singulares de una creciente población que envejece y cada vez vive más años?

Si en el curso del próximo siglo la esperanza de vida aumentara, aunque sea marginalmente, por encima de las estimaciones actuales, el tamaño de las poblaciones beneficiarias de sistemas de protección social ligados a la edad será entre dos y cinco veces mayor que la que ahora se prevé. Este cambio acarrearía dificultades financieras extremas.

En los países desarrollados, la evolución demográfica de la estructura por edades es beneficiosa en el corto plazo: las arcas de los sistemas de pensiones se están viendo fuertemente engrosadas por los impuestos de una cohorte desusadamente grande de población en edad laboral. No obstante, sería imprudente permitir que esta condición temporal nos llevara a un estado de complaciente tranquilidad. Cuando la estructura por edad en esos países llegue a ser rectilínea, la razón de beneficiarios a contribuyentes se multiplicará como las setas, y los excedentes de los sistemas de pensiones se evaporarán.

La solidez financiera de los sistemas de pensiones ya se ha visto amenazada en algunos países. A escala mundial, los peores problemas surgirán justo después del año 2010, cuando la generación de los nacidos en el período inmediato a la segunda guerra alcance la edad de jubilación. La certeza de la evolución demográfica del envejecimiento pronto forzará a los gobiernos a reestructurar sus planes de pensiones.

La evolución demográfica de la estructura por edad afectará a muchos aspectos de la sociedad, entre ellos el mercado de trabajo, la vivienda y el transporte, los costes de la energía, las pautas de jubilación y los sistemas de atención a domicilio o en instituciones, por mencionar sólo unos pocos. Por ejemplo, si persistieran las actuales tendencias hacia la jubilación temprana, los futuros retirados recibirían beneficios de los sistemas de pensiones durante treinta años o más y pasarían hasta un tercio de sus vidas en situación de jubilados. No podrán, pues, financiarse en el futuro las pautas actuales de trabajo y jubilación. Las estructuras sociales no han evolucionado con la misma rapidez que las estructuras por edad. El aumento en la esperanza de vida es, por consiguiente, un triunfo para la sociedad, pero muchos expertos en políticas sociales lo ven como un desastre inminente.

Aunque hemos subrayado la cara oscura del envejecimiento —debilidad e incapacidad—, también es cierto que la evolución demográfica de la estructura por edad generará una población anciana numerosa y saludable. Todas las personas mayores, tanto las sanas como las enfermas, precisarán opciones para contribuir a la sociedad. Para conseguir tal fin se requerirá una economía que proporcione oportunidades, amplias y flexibles, a personas mayores experimentadas y cualificadas, así como modificaciones en las infraestructuras físicas de la sociedad. Decisivo será que cambien las actitudes respecto del envejecimiento.

La clase médica continúa su guerra contra la muerte. Los investigadores en biología molecular siguen buscando caminos que ralenticen la tasa básica de envejecimiento. Esos esfuerzos nos llevan a pensar que el envejecimiento también proseguirá, e incluso se acelerará. Todo el mundo quiere vivir más, y la medicina ha contribuido a que ese sueño se haga realidad. Sólo ahora comienza la sociedad a comprender lo que ha puesto en movimiento al modificar las fuerzas de selección natural que han conformado la evolución del envejecimiento humano.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LIVING LONGER AND DOING WORSE? PRESENT AND FUTURE TRENDS IN THE HEALTH OF THE ELDERLY. Número extraordinario de *Journal of Aging and Health*, vol. 3, n.º 2, mayo de 1991.

THE OLDERST OLD. Dirigido por Richard Suzman, David Willis y Kenneth Manton. Oxford University Press, 1992.

AN AGING WORLD II. K. Kinsella y C. M. Taeuber. Center for International Research, EE.UU. Oficina del Censo, 1993.

Los supertelescopios terrestres

El control activo de la superficie de los espejos, los dispositivos de corrección de las turbulencias atmosféricas y las mediciones interferométricas nos abren ventanas al universo hasta ahora cerradas

Daniel Enard

¿Qué cabe esperar de la próxima década en materia de descubrimientos astronómicos? Se puede pronosticar que habrá al menos dos campos donde se progresará de manera espectacular: el de la evolución del universo primitivo y el de la existencia de planetas alrededor de otras estrellas.

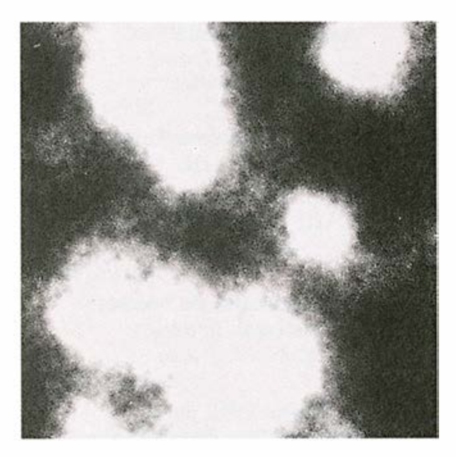
Los medios actuales de observación nos permiten detectar concentraciones de galaxias en el límite del universo conocido, pero no tenemos una visión de esas regiones lo bastante precisa como para determinar su origen y su evolución; debemos utilizar medios de observación más potentes, que alejen los límites de nuestro conocimiento y, sobre todo, nos hagan ver mejor y con más detalle las regiones accesibles.

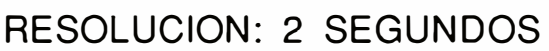
Al ser el brillo emitido por los cuerpos celestes nuestra única fuente de información, es esencial que accedamos al conjunto del espectro electromagnético, ya que cada uno de sus dominios nos ofrece informaciones diferentes y complementarias. Algunas regiones del universo, por ejemplo, están ocultas tras nubes de polvo que, sin embargo, son transparentes en el infrarrojo. En el otro extremo del espectro electromagnético, la observación en las zonas de los rayos X y gamma descubre fenómenos sumamente violentos, atribuibles quizás a agujeros negros.

Esta ampliación del campo espectral ha sido posible gracias, por un lado, al desarrollo de detectores en el infrarrojo y en ondas milimétricas, y gracias, por otro, a los progresos de la astronomía espacial. La observación desde el suelo está limitada por la transparencia de la atmósfera. Por fortuna para la humanidad, los ultravioletas y las radiaciones de longitudes de onda más cortas (rayos X y gamma) son absorbidos, sobre todo, por la capa de ozono, mientras que el infrarrojo y las ondas milimétricas lo son, sobre todo, por el vapor de agua; de ahí la búsqueda de lugares de observación a gran altitud y en regiones muy secas.

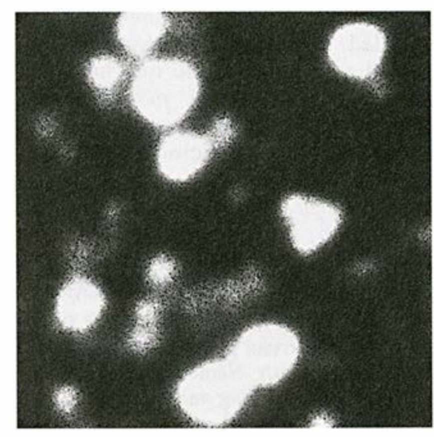
La observación desde el espacio elude estos límites y cubre el conjunto del espectro electromagnético; no obstante, la dimensión de los satélites y de las sondas espaciales es todavía pequeña. El telescopio Hubble, el mayor telescopio espacial existente, tiene sólo un diámetro de 2,4 metros, dimensiones modestas con respecto a las de los telescopios terrestres; pero, sobre todo, el coste de las operaciones espaciales es y seguirá siendo durante mucho tiempo sumamente alto, lo que reduce el número de misiones posibles. La observación espacial tiene también la ventaja de no sufrir la degradación de las imágenes que la travesía de la atmósfera causa; no obstante, el desarrollo de la óptica adaptativa, que compensa el efecto de la turbulencia atmosférica, tiende a restar importancia a esta ventaja. En un futuro pró-

DANIEL ENARD es jefe del departamento de telescopios del Observatorio Europeo Meridional en Múnich.

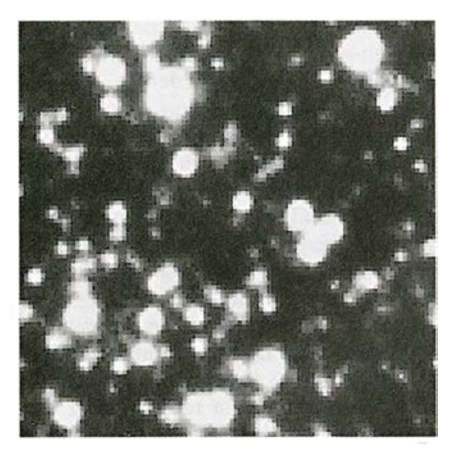




RESOLUCION: 2 SEGUNDOS



RESOLUCION: 1 SEGUNDO



RESOLUCION: 0,33 SEGUNDOS

1. IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE LAS IMAGENES. Estas imágenes muestran un mismo campo estelar, de unos 12 segundos de arco, próximo a la estrella Omega Centauri. Con una buena resolución angular se distingue una gran cantidad de objetos allá donde, con una resolución angular mediocre, parece que sólo hay unas pocas estrellas. Mejores telescopios y emplazamientos prometen logros considerables. Los nuevos telescopios permitirán obtener imágenes inferiores a 0,5 segundos de arco. Con la óptica adaptativa, se llegará a 0,1 segundos de arco; la interferometría bajará el umbral 10 veces más.

ximo, la calidad de las imágenes recibidas en tierra será semejante a la calidad que se consigue desde una plataforma espacial.

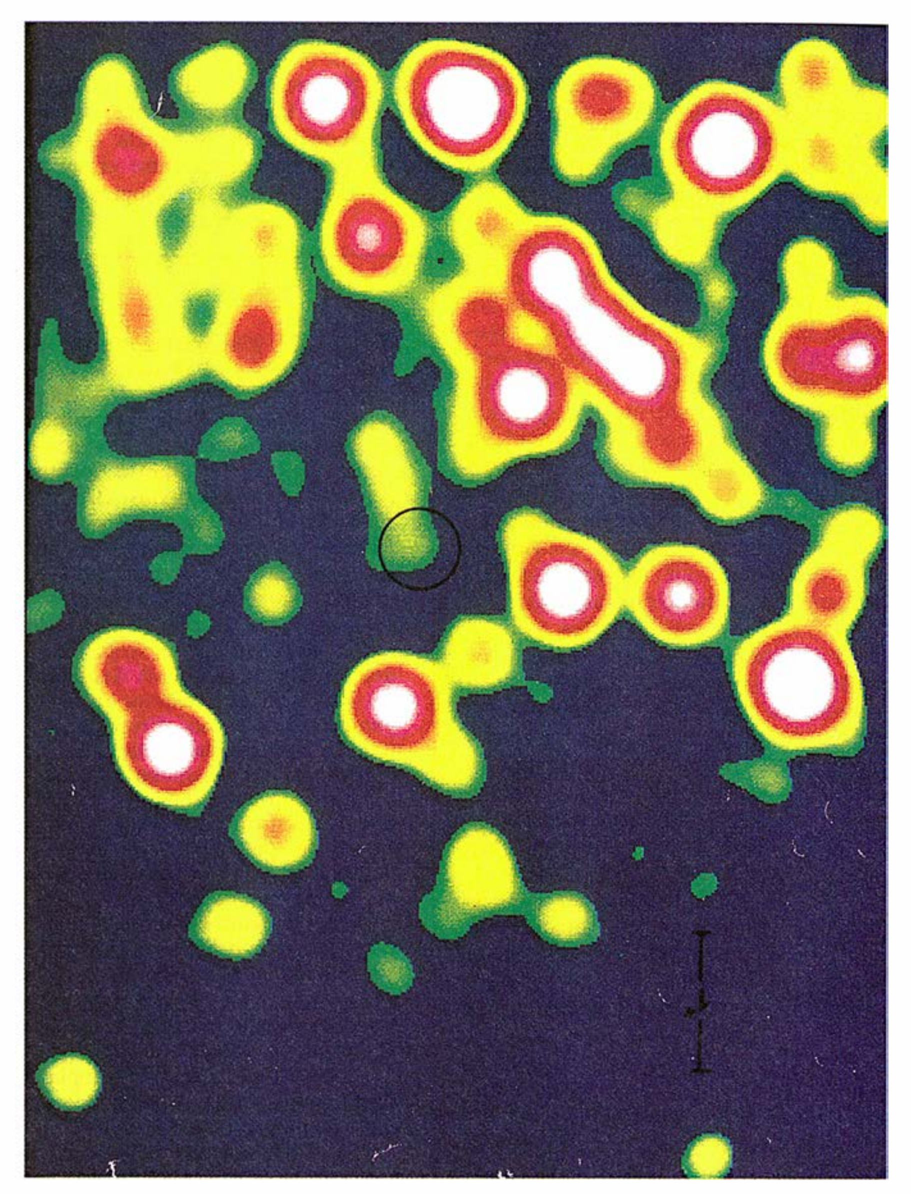
No hay por lo tanto competencia entre la astronomía espacial y la terrestre —salvo para obtener subvenciones—, sino una complementariedad, ya que las misiones espaciales abren dominios espectrales que no son observables desde tierra.

Hasta hace poco, la observación astronómica estaba condicionada por la eficacia de los detectores. La placa fotográfica fue sucesivamente sustituida por los detectores fotoeléctricos que utilizaban tubos de vacío y, sobre todo, de diez años a esta parte, por los detectores sólidos, entre los que destacan los detectores de carga acoplada, cuyas prestaciones y dimensiones mejoran constantemente. Puesto que los detectores tienen ahora una eficacia cercana a los límites teóricos, queda claro que sólo podrán lograrse nuevos progresos con telescopios mayores, capaces de colectar más luz; por ello, los astrónomos concentran todas sus esperanzas en una nueva generación de telescopios ópticos mucho mayores que los disponibles y diseñados para utilizar en todo su alcance nuevas técnicas de observación tales como la óptica adaptativa y la interferometría.

La primera cualidad de un telescopio es su capacidad para concentrar la luz y, por consiguiente, para distinguir, de una fuente estelar débil, el ruido de fondo circundante, sea éste producido por el propio cielo, por el detector o por otras fuentes. Con un mismo diámetro, un telescopio de mejor calidad no sólo capta más detalles del objeto observado, sino que detecta objetos más débiles y, por tanto, más alejados. Ese poder de concentración viene determinado esencialmente por la calidad de la superficie óptica, cuya desviación de la forma que teóricamente debería tener se mide en nanómetros (milésimas de micrometro).

Hay, no obstante, dos límites físicos de los cuales es difícil librarse del todo. Uno es la difracción, es decir, el ensanchamiento de la imagen debido a la naturaleza ondulatoria de la luz y a las dimensiones finitas del espejo primario; el otro es la turbulencia de la atmósfera, que tiende a emborronar las imágenes.

La difracción será tanto más importante cuanto mayor sea la longitud de onda. En los telescopios modernos, que trabajan no sólo con luz visible sino también en infrarrojos, los efectos de la difracción pueden ser preponderantes en algunos casos.



2. ¿QUE CONTIENE EL CENTRO DE NUESTRO GALAXIA? ¿Un agujero negro que ha producido la acreción de toda la materia cercana a él? ¿Cúmulos de estrellas jóvenes o viejas? ¿Gas molecular en rápida rotación? Todo eso sin duda, pero es tan obscuro el disco de polvo galáctico en el dominio de la luz visible, que sólo las ondas de radio y la radiación infrarroja nos llegan desde el centro de la galaxia. Esta fotografía es la imagen infrarroja más detallada de esa región jamás obtenida. La resolución alcanza 0,25 segundos de arco y ha sido conseguida por tratamiento matemático a partir de una imagen obtenida por un telescopio de 3,5 metros (el NTT de la ESO). Se perciben cúmulos de estrellas, pero las estructuras y movimientos individuales siguen indiscernibles. La finura de detalle que teóricamente es posible obtener con un solo telescopio de ocho metros quintuplica la de esta imagen; la de un gran interferómetro, la multiplica por 50. (R. Genzet, Instituto Max Planck.)

Su reducción requiere la utilización de espejos del mayor tamaño posible. Los efectos de turbulencia pronto serán eliminados por la óptica adaptativa, que debería proporcionar una mejora notabilísima de la resolución espacial. A este primer paso, decisivo, hacia la alta resolución espacial le seguirá en cuanto las técnicas interferométricas sean operativas otro avance no menos considerable.

Principios de los nuevos telescopios en tierra

Los principios en que los telescopios ópticos se fundan han evolucionado poco desde la aparición, a mediados del siglo XIX, de los telescopios de espejo. Un espejo cóncavo de gran diámetro —el espejo primario, a menudo de forma parabólica o hiperbólica— colecta el flujo luminoso y lo concentra hacia un espejo secunda-

rio, generalmente convexo, que forma una imagen del cielo, bien detrás del espejo primario, bien lateralmente cuando se utiliza un espejo adicional para desviar el haz.

La realización del espejo primario constituye la primera y principal dificultad. Los mayores espejos existentes son el del legendario telescopio de 5 metros de monte Palomar y el del ruso de seis metros en la vertiente norte del Cáucaso. De un vidrio sensible a las variaciones de temperatura, la mínima modificación de ésta en la masa de vidrio deforma la superficie del espejo y provoca que la calidad de las imágenes recibidas por estos telescopios sea aleatoria y, a menudo, mediocre si la comparamos con las que proporcionan los telescopios más modernos, que utilizan materiales con una dilatación casi nula.

Los espejos están sujetos por un cierto número de soportes llamados astáticas, que mantienen el espejo en estado de flotación, independientemente de su posición con respecto a la vertical, y que, por lo tanto, no deforman su superficie. Esta técnica recurre sólo a sistemas mecánicos sencillos, pero requiere espejos más bien rígidos y, por tanto, pesados.

Durante décadas, la regla de oro consistió en aplicar una relación radio/espesor del orden de seis a ocho. Un espejo de cuatro metros pesa así cerca de 15 toneladas; aplicando la misma regla, un espejo de 10 metros pesaría 230 toneladas, y el telescopio correspondiente alcanzaría ¡varios miles de toneladas! De ahí que los astrónomos hayan eludido el obstáculo diseñando espejos ligeros y deformables controlados por un sistema electrónico, estructuras huecas en forma de panal de abeja o yuxtaponiendo espejos más pequeños en mosaico.

Cualquiera que sea el camino escogido, cuesta hoy pensar en el diseño de espejos cuyo diámetro supere los ocho o diez metros; ocho metros es la medida adoptada normalmente para los espejos monolíticos. Después de todo, es modesto el beneficio que comportan estos espejos respecto a los telescopios de cuatro o seis metros ya existentes. La realización de superficies colectoras mayores se logra mediante la asociación de varios espejos cuyas imágenes se recombinen por medio de un sistema óptico complementario. Es posible colocar los espejos en una montura única —como ocurre en los telescopios de espejos múltiples cuyo prototipo es el MMT de la Universidad de Arizona— o diseñar telescopios independientes asociados en red.

Los grandes proyectos

Los proyectos actuales se fraguan, las más de las veces, sobre la base de la cooperación, a escala internacional o directamente entre organizaciones científicas. La cooperación es provechosa por dos razones: por un lado, permite compartir los costes de desarrollo, y por el otro posibilita que las diferentes comunidades científicas tengan acceso a distintos instrumentos, cada uno de ellos con su características específicas, lo que

Gran telescopio europeo

La OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) creó en 1992 el *Foro de la Megaciencia* con el propósito de que estudie los grandes proyectos característicos de la "gran ciencia". Se eligió el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) como sede de la primera reunión del Foro. Allí, un grupo de expertos discutió sobre el futuro de la astronomía y los grandes proyectos a ella dedicados. La instalación en los observatorios de Canarias de un gran telescopio europeo, que se añadiría a la lista de instrumentos de esas dimensiones que se han venido planteando últimamente, fue una de sus recomendaciones.

Instituciones de diferentes países han encargado a comisiones de astrónomos la redacción de informes que les guíen acerca de qué debe financiarse. Todos llegan a la misma conclusión: el futuro de la astronomía está en la construcción de grandes telescopios óptico–infrarrojos, que habrían de instalarse en los más favorables lugares del planeta; los observatorios espaciales deberían reservarse para aquellas longitudes de onda que la atmósfera intercepta. (En un futuro más lejano, la propia Luna podría convertirse en punto de emplazamiento de un observatorio.)

Muy descompesado se muestra el porvenir de la astronomía europea: es chocante que su presencia en el hemisferio Sur esté excelentemente asegurada gracias a los cuatro telescopios de 8 metros del proyecto VLT, mientras que en su propia mitad del mundo aún no hay nada consolidado —ni el proyecto *Columbus*, en el que participa Italia, ni el proyecto *Gemini*, en el que hace lo propio el Reino Unido, están aún resueltos.

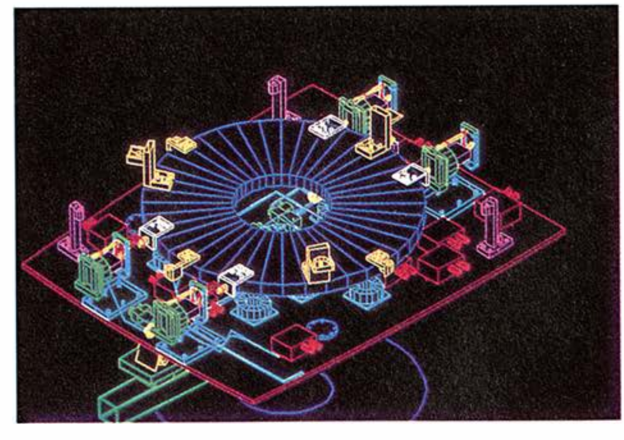
Sin embargo, la comunidad astronómica europea (la *European Astronomical Society*, en concreto) está empeñada en disponer de un gran telescopio en el hemisferio septentrional. Prueba su interés en ello el hecho de que el telescopio de 4,2 metros (el tercero del mundo por su tamaño que sea totalmente operativo) del observatorio del Roque de los Muchachos no pueda atender el 75 por ciento de las peticiones de tiempo de observación que recibe. Puras razones económicas, debidas a los compromisos previos de los países europeos en tierra y en el espacio, son las que retrasan el proyecto del gran telescopio europeo.

El espejo de 8 metros

Hay un preproyecto técnico. En él se propone la construcción de un telescopio óptico-infrarrojo cuya potencia cuadruplicaría la del telescopio "William Herschel", de 4,2 metros. El espejo primario, de 20 a 25 centímetros de espesor, sería mucho más delgado que el de los telescopios ya construidos. Fabricado de sílice fundida, con un coeficiente de expansión térmica nulo, tendría un peso de 24 toneladas, lo que permitiría que se redujese la masa total del tubo del telescopio y su coste, aumentando la relación entre el coste de la óptica y el monto global del proyecto.

Dispondría el telescopio de un foco primario con relación entre la longitud focal y el diámetro f/1,8 intercambiable con un sistema de espejos secundarios (f/6, f/8 y f/13). Y en esta última configuración, dado que la montura es del tipo altazimutal (un eje vertical y otro horizontal) dispondría de dos focos Nasmyth, un foco Cassegrain principal y dos secundarios.

Las innovaciones principales de este diseño radican en su sistema activo de soporte del espejo, en el sistema de aluminizado (que podría ser de pulverización, frente al más tradicional de



Diseño mecánico asistido por ordenador del banco de pruebas del telescopio de 8 metros *(izquierda)* y su ensamblaje real *(derecha)*. Se trata de un banco de pruebas simulador del sistema activo que soporta el espejo en telescopios altazi-

propicia observaciones de tipo complementario.

El telescopio norteamericano Keck, de diez metros, está constituido por un espejo segmentado, compuesto por 36 elementos hexagonales de 1,8 metros. Cada elemento debe ser trabajado y pulido de forma que corresponda exactamente a una porción bien definida del espejo primario parabólico; la superficie de cada elemento ya no es de revolución y, por ello, su fabricación es bastante más delicada que la de una superficie clásica que tiene un eje de simetría.

Una vez fabricados y montados en el telescopio, los distintos elementos deben ser colocados con gran precisión, de forma que restituyan la superficie parabólica continua equivalente a la de un gran espejo único. Esto sólo se logra con un servocontrol ininterrumpido de la posición de cada elemento con respecto a los elementos adyacentes. Dado que la precisión requerida por un espejo astronómico es de unas decenas de nanómetros, el diseño de los elementos así como su colocación constituyen una hazaña tecnológica. La posición de cada segmento del telescopio Keck está controlada en orientación y en traslación por tres soportes activos, y se mide con respecto a los elementos vecinos mediante unos sensores de posición con una sensibilidad próxima al nanómetro. El conjunto del sistema de control comprende 108 grados de libertad y 168 sensores de posición.

El telescopio europeo VLT ("Very Large Telescope", Gran Telescopio), en proceso de realización, constará de una red de cuatro telescopios de ocho metros. Cada telescopio tiene un espejo monolítico de ocho metros de diámetro; pueden todos utilizarse independientemente, de forma convencional pues, o de modo combinado, en cuyo caso pueden apuntarse hacia un mismo objeto dos, tres o cuatro telescopios y superponerse sus haces. El concepto de red ofrece, por tanto, una mayor flexibilidad de utilización, al precio, no obstante, de una mayor complejidad, ya que la recombinación de los haces requiere una óptica compleja.

Otra ventaja de esta concepción del telescopio es que posibilita la interferometría de gran base, que resolverá detalles unas 25 veces más pequeños que los resueltos por los telescopios existentes. La interferometría óptica, una de las prioridades del proyecto VLT, se cuenta entre las técnicas de observación más prometedoras.

El proyecto Columbus asocia a la Universidad de Arizona con Italia. Columbus se compone de dos telescopios de ocho metros, colocados en una montura única. Los dos telescopios apuntan, por tanto, siempre hacia el mismo objeto, y los haces están siempre asociados. El uso de un telescopio de este tipo es menos flexible que el de una red de telescopios independientes, pero el que haya una única montura abarata su coste. Puede lograrse también que los haces interfieran como lo

para el hemisferio norte

evaporación), en el sistema de codificadores que definen y controlan el movimiento y la posición del tubo del telescopio, y en el sistema de cojinetes hidrostáticos de toda la estructura. El sistema de soportes del espejo se ha diseñado para minimizar los efectos locales debidos a fuerzas de apoyo y a cargas por el viento, y corrige la superficie reflectante varias veces por segundo hasta conseguir la superficie especificada. Este sistema debe operar linealmente y con repetibilidad, y tiene que hacerlo con un alto grado de precisión. Mediante el cálculo por elementos finitos, método computarizado de resolución de las ecuaciones de resistencia de materiales, se simulan el espejo y los diferentes soportes, y se visualizan las deformaciones locales. Se encuentran así la posición óptima de los soportes y la fuerza que cada uno ha de aplicar —mediante pistones neumáticos (384 en la dirección axial) controlados por un servosistema de gran precisión (1/20.000)— en las distintas posiciones del telescopio.

Se ha demostrado recientemente que es posible fabricar espejos de menisco delgado (como los que está previsto que se utilicen en el VLT y en el SUBARU); se ha despejado así uno de los principales puntos oscuros con que se enfrentaban los proyectos de grandes telescopios hace unos años. Las mayores dificultades técnicas, o han sido ya resueltas, o se está en vías de que lo sean, como es el caso del aluminizado por técnicas de pulverización.

Lugar: Canarias

Al estar la calidad de su cielo protegida por ley, la isla de La Palma es una reserva mundial para la astronomía. Goza, además, de unas condiciones excepcionales para la observación, no peores que las de Hawai o Chile, en contra de los que algunos, por razones interesadas o simple ignorancia, afirman. Hasta para la observación en infrarrojos es el observatorio del Roque de los Muchachos, aun estando a menor altitud, comparable al de Mauna Kea. El observatorio canario está, también, dotado de buena infraestructura, incluidas las telecomunicaciones, y tiene como base científica y técnica el Instituto de Astrofísica, que garantiza el mantenimiento y la explotación científica. La organización, del tipo "club", propicia un uso muy flexible y económico (del orden del 30 por ciento más barato que en otros observatorios): el IAC aporta la infraestructura y los servicios comunes, y gestiona el funcionamiento general, mientras que las instituciones usuarias de los diferentes países mantienen la propiedad de sus telescopios y contribuyen proporcionalmente a los gastos comunes. La cercanía con Europa y la benignidad del clima hacen que el acceso sea fácil y cómodo todo el año.

Los observatorios del IAC reúnen, ya en estos momentos, doce grandes telescopios y otros instrumentos y experimentos menores; es Canarias, pues, el observatorio europeo del hemisferio Norte.

Todo está dispuesto para que pueda construirse en España la casi totalidad del telescopio. La fabricación de este tipo de espejos sólo puede acometerse por un par de empresas internacionales. Se está configurando en Canarias una empresa destinada a construir y explotar este gran telescopio. Habrá participación pública, fondos FEDER y alguna contribución privada.

Un telescopio es una máquina compleja que requiere tecnología avanzada. Su construcción, por lo tanto, sería un acicate para el desarrollo técnico de Canarias.



mutales de gran diámetro. El disco de 1 metro de diámetro que simula el espejo primario flota sobre colchones de aire. Junto a bucles analógicos, un ordenador controla las fuerzas y presiones del sistema, y actúa sobre las válvulas del flujo de aire.

LOS PROYECTOS DE GRANDES TELESCOPIOS

Nombre	Espejo Primario	Emplazamiento del Telescopio	Costo (millones de dolares)	Finalización
VLT (4 telescopios)	4 x 8,2 m. Menisco delgado	Cerro Paranal (Chile)	315	1999
Keck I Keck II	10 m segmentado 10 m segmentado	Mauna Kea (Hawai) Mauna Kea (Hawai)	91 85	1993 1996
Subaru	8.3 m. Menisco delgado	Mauna Kea (Hawai)	200	1999
Gémini	2 x 8,4 m. Tipo de espejo por determinar	1 en Mauna Kea (Hawai) 1 en Cerro Pachon (Chile)	176 176	1999 2001
Columbus	2 x 8,4 m. Tipo de espejo: panal de borosilicato	Mt. Graham (Arizona)	60	1997
MMT (Telescopio espejos multiples)	un espejo primario de 6,5 m para remplazar los seis espejos de 1,8m. Panal de borosilicato	Mt. Graham (Arizona)	20	1996
Magallanes	6,5 m. Panal de borosilicato	Las Campanas (Chile)	30	1997

harían en una red. La distancia entre los dos espejos, factor que determina la resolución angular, es menor que en el caso de la red; ahora bien, y por ello constituye otra ventaja la montura única, los problemas de estabilidad son bastante menos críticos.

Existe un cierto número de proyectos de telescopios que se basan en la utilización de un solo espejo monolítico. Dichos proyectos son menos ambiciosos que los anteriores, pero utilizan las mismas técnicas de diseño de espejos primarios. Son, de hecho, bastante similares en su principio de funcionamiento a los telescopios elementales del proyecto VLT, salvo que no tienen sistema de recombinación de haces. Este es el caso, entre otros, del proyecto Gemini, que consta de dos telescopios idénticos, uno en el hemisferio Norte y otro en el hemisferio Sur, y del proyecto nacional japonés (SUBARU).

En lo que se refiere a espejos monolíticos, se ha establecido una "normalización" de hecho en torno a los ocho metros de diámetro. Esta dimensión corresponde a una extrapolación, que se cree razonable, de la capacidad de las técnicas de fabricación de espejos; corresponde también a un máximo práctico por lo que toca al transporte.

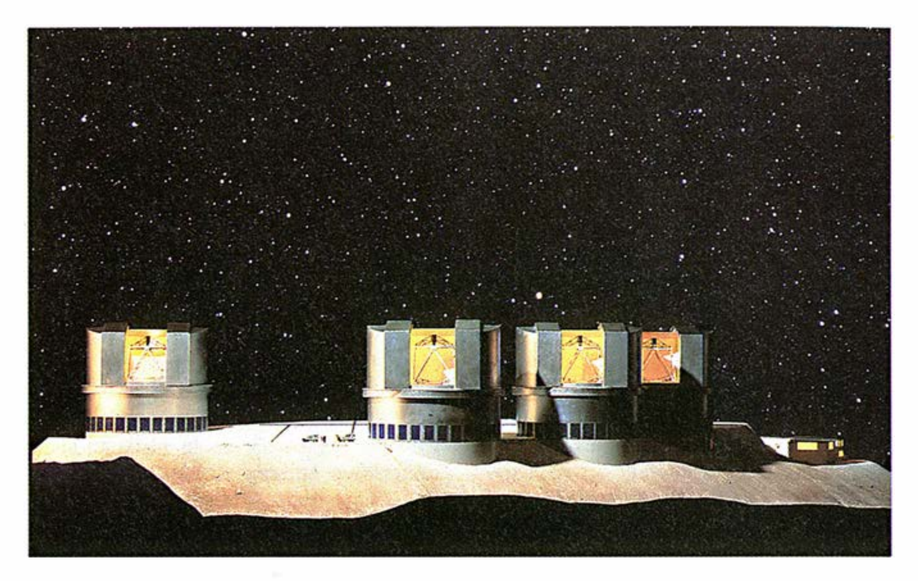
La fabricación del espejo primario ha sido siempre el obstáculo mayor en la construcción de los telescopios. Aunque diseñado ya por Newton, el telescopio de espejos sólo reemplazó progresivamente al anteojo astronómico a partir de la segunda mitad del siglo XIX, gracias a la mejora en las técnicas de fundición del vidrio. El anteojo, que se basaba en una combinación de lentes, tenía la limitación de la homogeneidad del vidrio y, sobre todo, de su gran volumen.


3. ESPEJO "DELGADO" DEL VLT en proceso de desbaste. En esa fase, el diámetro es de 8,6 metros y el espesor de unos 250 milímetros. Las dimensiones finales serán de 8,2 metros y 175 milímetros.

Una característica esencial del material utilizado para la fabricación de un espejo es su dilatación térmica. El pulido óptico consiste en una lenta abrasión del material, que produce una cantidad grande de calor y tiende a deformar la superficie. Son necesarios largos tiempos de estabilización antes de poder proceder a un control de la superficie. A medida que uno se acerca a la forma deseada, los controles se vuelven cada vez más frecuentes, y el tiempo de fabricación aumenta drásticamente en función de la precisión buscada. Durante su utilización, el espejo tiende también a deformarse al paso de las variaciones de temperatura, que, en tamaña masa, no se propagan de manera uniforme. No es sorprendente, por tanto, que la calidad óptica de los telescopios haya seguido la evolución de la estabilidad térmica de los materiales.

La utilización de vidrio de borosilicato (más conocido por la apelación comercial de vidrio "pyrex"), que posee un coeficiente de dilatación cerca de dos veces más bajo que el del vidrio normal, permitió en un primer momento mejorar sensiblemente la calidad de los espejos, y también, a causa de las tensiones más bajas en el momento del enfriamiento, fundir masas más importantes. La fabricación de los dos mayores telescopios existentes (el del monte Palomar y el seis metros soviético) se basó en el uso de este tipo de vidrio.

La sílice, que existe en estado natural en forma cristalina (el cuarzo), posee notables propiedades físicas, en particular para la realización de espejos, a causa de su excelente ho-



4. **PROYECTO EUROPEO VLT. Este proyecto consiste en una red de cuatro telescopios de ocho metros de apertura. Cada telescopio elemental es independiente, pero puede ser acoplado a los demás para aumentar la superficie colectora o la resolución angular en modo interferométrico. En el primer plano se distinguen los telescopios auxiliares de 1,8 metros destinados a completar la red en modo interferométrico. El VLT se instalará en el norte de Chile, en el monte Paranal, a 2600 metros de altitud.**

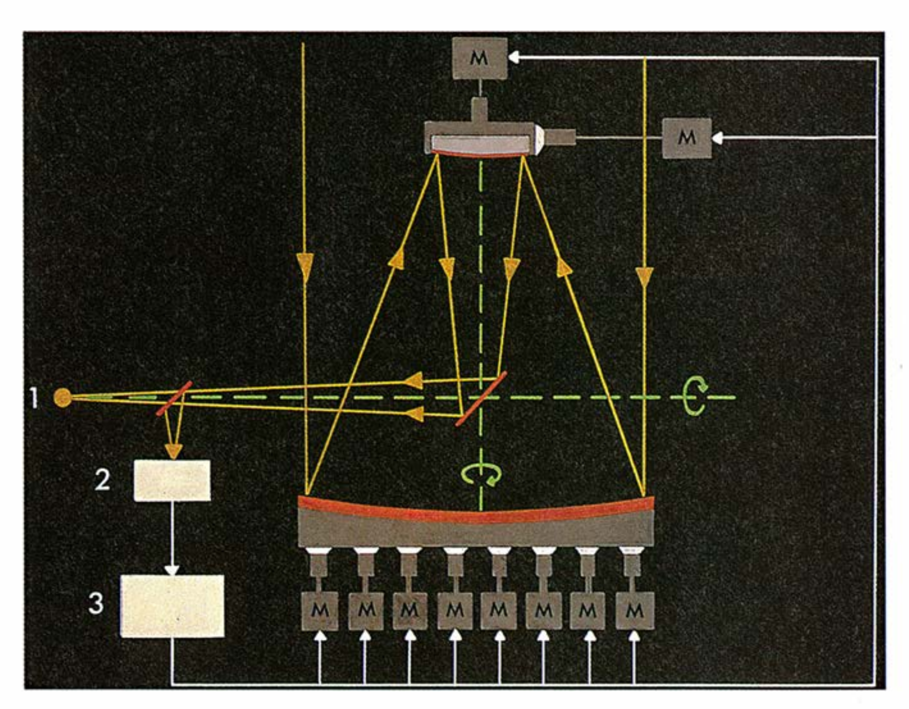
mogeneidad y de su dilatación térmica muy baja. Las técnicas que condujeron a la realización de espejos de silicio amorfo de gran dimensión por fusión de bloques más pequeños se desarrollaron en los años 1950 y 1960, y varios telescopios de dos a cuatro metros de aquella época fueron equipados con espejos de silicio de calidad muy alta. Recientemente, la Sociedad Corning, de los Estados Unidos, recibió un pedido de un substrato de silicio de ocho metros de diámetro para el proyecto japonés.

Más o menos por la misma época, varios fabricantes de productos de vidrio desarrollaron los materiales "vitrocerámicos", cuya dilatación térmica resultante es casi nula gracias a la combinación de un vidrio con dilatación positiva y de una cerámica con dilatación negativa. El material más utilizado es el zerodur, producido por la sociedad alemana Schott. Dicho material ha sido elegido para los substratos de ocho metros del proyecto VLT. Las vitrocerámicas tienen hoy en día aplicaciones múltiples; por ejemplo, para la fabricación de esas placas de cocción eléctricas que se presentan en forma de una simple placa de vidrio perfectamente plana y de fácil mantenimiento. En los dos casos, al no dilatarse puede el material soportar choques térmicos importantes.

La masa de los espejos

Los imperativos de coste, al igual que las dificultades tecnológicas, llevan a diseñar espejos más ligeros, que sean capaces, en todo caso, de mantener la forma geométrica de la superficie óptica y, por tanto, rígidos. La solución ideal consistiría en aligerar el substrato utilizando una estructura hueca en panal de abeja. No todos los materiales se prestan de igual modo a las técnicas de aligeramiento. Para los grandes espejos, un substrato aligerado parece hoy en día posible, técnica y económicamente, sólo con el vidrio de borosilicato (pyrex). La considerable dilatación del material puede generar defectos debidos a la estructura cóncava que tiende a imprimirse en la superficie cuando la temperatura no es uniforme. El método utilizado para salvar este obstáculo consiste en controlar la temperatura del espejo con una precisión de 0,1 grado, tanto durante el pulido como durante la utilización. El sistema de servocontrol en temperatura del espejo se vuelve entonces, para un objeto de tal dimensión, muy complejo. Los proyectos Columbus y Gemini están basados en espejos aligerados en panal de abeja, realizados por la Universidad de Arizona.

Una posibilidad para la fabricación de espejos ligeros consiste en utilizar un espejo muy fino, relativamente flexible, cuyas deformaciones sean compensadas por el control de las fuerzas aplicadas sobre la cara posterior. Este sistema, llamado de "óptica activa", funciona como un bucle de servocontrol. Un sistema de cálculo analiza constantemente la imagen de

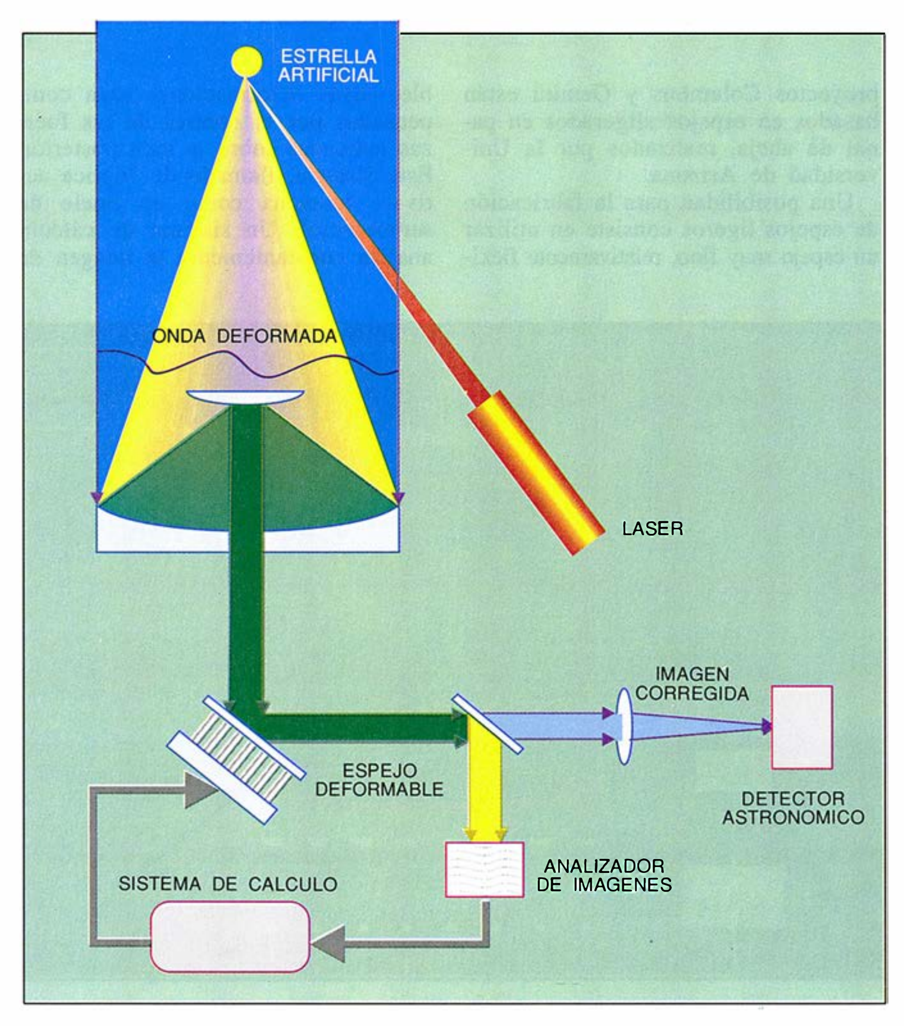


5. **PRINCIPIO DE LA OPTICA ACTIVA. Los espejos astronómicos deben conservar su forma con una precisión muy grande, lo que explica su peso y grosor habituales. La óptica activa se contenta con un espejo delgado y relativamente flexible, cuya forma se controla por medio de soportes activos que actúan en la cara posterior. La imagen dada por el telescopio *(1)* es analizada por un analizador de imagen *(2)*. Un sistema de cálculo *(3)* determina las fuerzas a aplicar en el espejo para que su forma óptima se conserve, así como las variaciones de posición a aplicar al espejo secundario para que se mantenga el alineamiento del telescopio.**

una estrella brillante tomada como referencia y determina las correcciones de fuerzas necesarias para mantener la calidad de la imagen, fuerzas que son ejercidas por soportes electromecánicos controlados por ordenador. La primera vez que se utilizó este procedimiento fue en el telescopio NTT de la ESO, puesto en servicio en 1990 en el observatorio chileno de La Silla. El mismo principio está siendo utilizado en el VLT y para el proyecto japonés, donde se emplean espejos en menisco de unos 20 centímetros de espesor por ocho metros de diámetro. Los espejos pesan unas 20 toneladas y necesitan varios centenares de soportes.

El control activo de la superficie de los grandes espejos es la innovación por excelencia en materia de telescopios. Se inscribe en una evolución general por la que sistemas multifuncionales, que se adaptan por sí mismos a su entorno, van sustituyendo a los sistemas mecánicos pasivos, constreñidos a desempeñar una función muy determinada. El interés de la óptica activa es múltiple. Permite disminuir considerablemente la masa de los espejos, lo cual reduce de forma también notable su inercia térmica y facilita su adaptación al entorno. El servocontrol *in situ* de la forma del espejo permite también disminuir en cierta medida las tolerancias de fabricación y reducir costes y plazos. Otra posibilidad que la óptica activa ofrece, y que todavía no ha sido explotada, es la utilización de materiales menos nobles que el vidrio, pero más fáciles y menos costosos de producir. El aluminio parece particularmente interesante. Su fuerte dilatación es en parte compensada por su buena conductibilidad térmica, que evitaría los gradientes internos y mantendría con relativa facilidad el espejo a temperatura ambiente. La posible falta de estabilidad a largo plazo y las deformaciones residuales podrían ser compensadas sin dificultad por la óptica activa.

Por supuesto, la óptica activa también se utiliza para corregir otros errores. El análisis de la imagen permite, por ejemplo, determinar los desplazamientos del espejo secundario, con lo que se puede compensar la flexión de la estructura y mantener el alineamiento de los distintos elementos ópticos.



6. PRINCIPIO DE LA OPTICA ADAPTATIVA. La onda que al pasar a través de la atmósfera se deforma es corregida por un espejo deformable. Los parámetros de la corrección son establecidos por una computadora a partir de las informaciones que un analizador de imagen proporciona. La imagen analizada es la del propio objeto estelar, si es bastante luminoso, o la de una estrella brillante vecina, utilizada como referencia, o si no, la de una estrella artificial creada por un haz láser que excita algunos átomos de las capas altas de la atmósfera.

El pulido de los espejos

El principio básico del pulido óptico consiste, en lo esencial, en una lenta abrasión del material por frotamiento, utilizando abrasivos cada vez más finos. Se han experimentado nuevas técnicas —la abrasión por bombardeo iónico o electrónico es una de ellas—, pero todavía son procesos de laboratorio o han encontrado aplicación sólo en piezas pequeñas. El pulido de grandes espejos sigue basado en una técnica convencional.

No obstante, varios factores permiten mejorar la calidad del pulido y su rendimiento. La utilización de materiales estables, así como los progresos realizados en las técnicas de control —gracias, en particular, al desarrollo de detectores de carga acoplada de gran capacidad y al tratamiento por ordenador de cantidades ingentes de información— permiten ahora automatizar operaciones que hace poco eran más un arte que una técnica.

Así, el pulido de un gran espejo de varias decenas de metros cuadrados dura menos de dos años —plazo comparable al de un espejo de dos metros de diámetro hace tan sólo diez años—. Este progreso es esencial para la realización de proyectos ambiciosos en tiempos aceptables.

El pulido de los segmentos de un espejo en mosaico presenta sus dificultades. Cada segmento es una porción de parábola y, por tanto, ya no es axisimétrico. Además, es bien sabido que los bordes extremos de una superficie óptica son de calidad mediocre, lo cual obliga a menudo a no utilizar la totalidad de la superficie del espejo. En el caso de un espejo segmentado, dicho efecto tiene consecuencias enojosas, puesto que los bordes de los segmentos están repartidos por el espejo. Los efectos de borde deben corregirse sin demora. A pesar de estas dificultades, el proyecto Keck ha conseguido producir segmentos de buena calidad conju-

gando técnicas de pulido clásicas y correcciones finas de la superficie por bombardeo iónico. La superficie esférica se obtiene colocando el espejo bajo tensión durante el pulido, de manera que la deformación así producida sea inversa a la que se necesita. El espejo se pule según una esfera, y toma la forma deseada cuando las tensiones se relajan.

La corrección de las perturbaciones atmosféricas

Una vez que la óptica de los telescopios es casi perfecta, la calidad de las imágenes sigue aún sujeta a las perturbaciones sufridas por el haz de luz estelar en la atmósfera terrestre. A causa de las variaciones de presión y de temperatura, una onda plana procedente de un objeto celeste se deforma antes de alcanzar el telescopio. La alteración es similar a la que produce un espejo malo, y puede ser compensada, gracias a un principio análogo al de la óptica activa, por medio de un espejo corrector deformable.

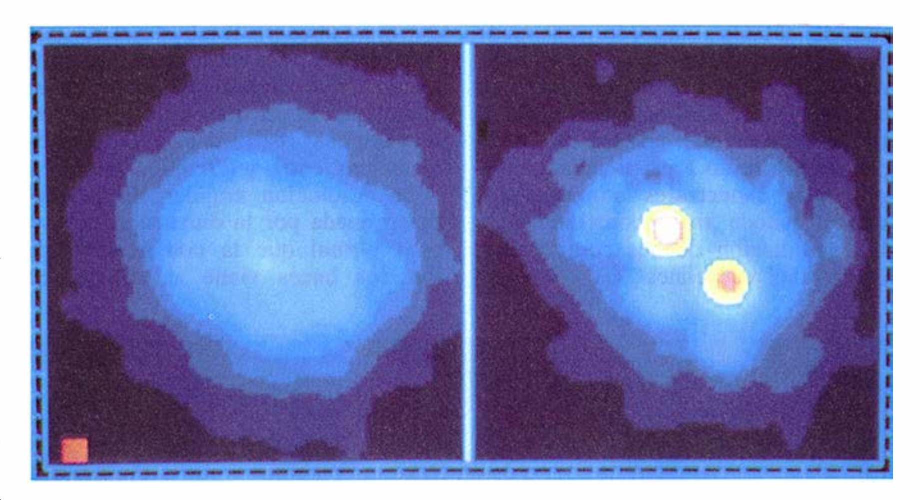
No obstante, la corrección no puede ser efectuada por el propio espejo primario, lento en reaccionar, ya que las perturbaciones producidas por la atmósfera son muy rápidas, del orden de 10 a 30 hertz, y muy localizadas. La técnica empleada, llamada óptica adaptativa, utiliza un espejo corrector mucho más pequeño y que se deforma con mayor facilidad. Dichos espejos correctores están formados por una membrana reflectora flexible, cuya forma está controlada por una matriz de cristales piezoeléctricos. El principio del bucle de servocontrol, similar al de la óptica activa, se basa en el análisis de la imagen del propio objeto o de una estrella brillante situada en la proximidad.

Las longitudes de onda cortas se ven más afectadas por el paso a través de la atmósfera, y requieren frecuentes e importantes correcciones. Cuanto más aumenta la dimensión del haz, mayor es el número de elementos correctores.

El interés y la realidad de la óptica adaptativa han quedado demostrados recientemente por un dispositivo experimental desarrollado por un grupo de industriales e investigadores franceses. Aunque el espejo corrector de ese instrumento tiene sólo 19 soportes, se han logrado, en el infrarrojo cercano, imágenes casi perfectas, es decir, sólo limitadas por la difracción, con telescopios de tamaño medio.

El análisis de la imagen de la estrella de referencia requiere cierto flujo luminoso; cuanto más rápida sea la corrección, más corto será el tiempo de medición, y más brillante deberá ser la estrella. Rara vez existe una fuente con el brillo conveniente en la proximidad del objeto observado, lo cual restringe la utilización de la óptica adaptativa.

Sin embargo, el remedio está ahí. O casi. Puesto que no hay necesariamente una estrella brillante disponible cerca de cada objeto celeste, creémosla. Parece posible crear una estrella artificial en la muy alta atmósfera concentrando un haz láser de fuerte intensidad que excita ciertos átomos, en particular los de sodio, presentes en algunas capas con la concentración suficiente. Teniendo en cuenta los progresos rápidos de los láseres de potencia, es probable que la próxima década vea, gracias a esta técnica de generación de estrellas artificiales, la aplicación sistemática de la óptica adaptativa a la observación astronómica.



7. LA OPTICA ADAPTATIVA se vuelve realidad. El primer sistema experimental de óptica adaptativa, bautizado "come-on", ha sido realizado por un grupo de industriales e investigadores franceses *(Onera, Laserdot*, Observatorio de Meudon), en cooperación con ESO. Este dispositivo comprende un espejo, deformable bajo la acción de 19 soportes piezoeléctricos, y proporciona imágenes próximas al límite de difracción en el infrarrojo cercano con telescopios de uno a tres metros de diámetro. La frecuencia de corrección es de unos diez hertz. La imagen muestra una pareja de estrellas, HR6658, separadas por una distancia de 0,38 segundos de arco que, sin la óptica adaptativa, aparecen como un solo objeto.

La interferometría

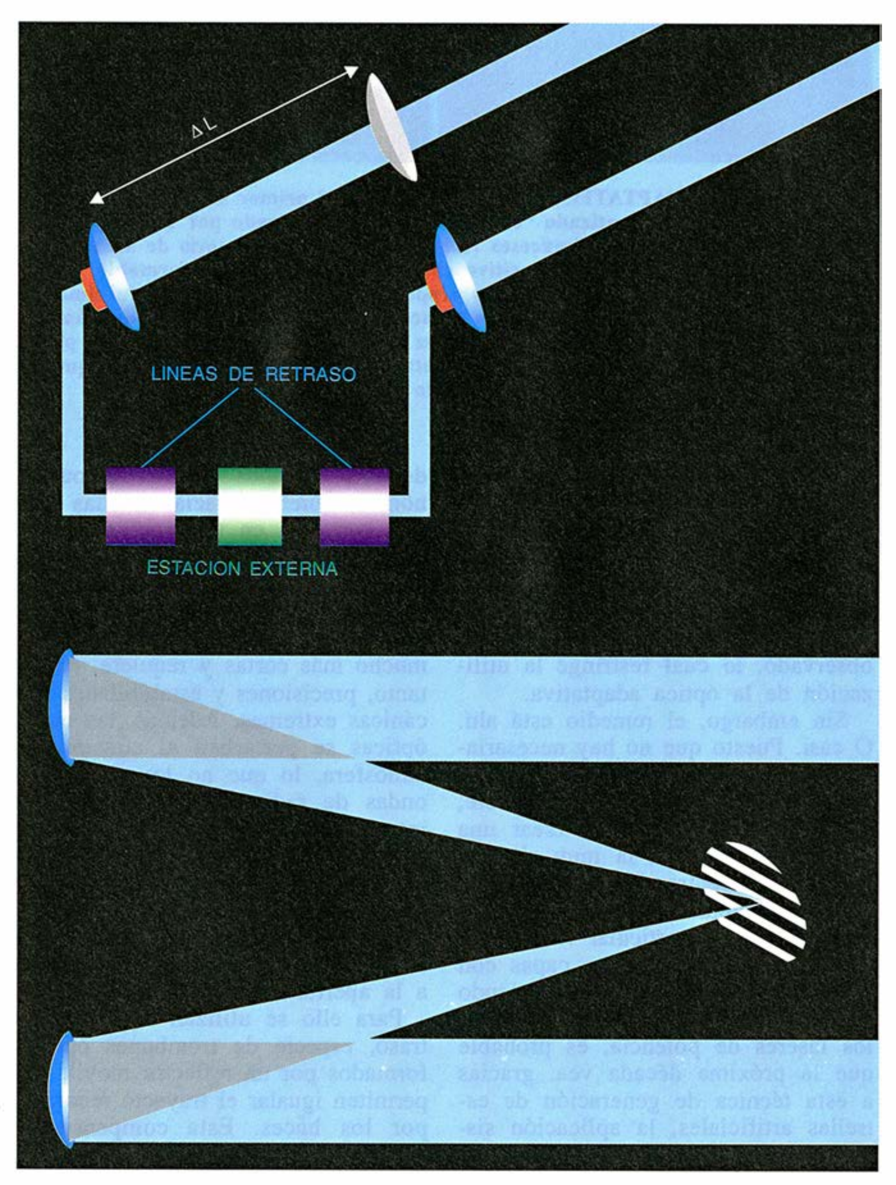
Si bien las técnicas de óptica adaptativa permiten, en principio, obtener una calidad de imagen próxima al límite teórico determinado por la relación (λ/D) (longitud de onda/diámetro de apertura), existen métodos que permiten ir aún más allá en la síntesis de la información dada por distintos telescopios. Dichas técnicas de "síntesis de apertura", o interferometría, han sido desarrolladas desde hace 30 años por los radioastrónomos, quienes gracias a ellas pueden apoyarse en telescopios instalados en continentes distintos. Es mucho más difícil, sin embargo, aplicar estas técnicas al dominio óptico, que utiliza longitudes de onda mucho más cortas y requiere, por lo tanto, precisiones y estabilidades mecánicas extremas. Además, las ondas ópticas se perturban al atravesar la atmósfera, lo que no les pasa a las ondas de radio. El principio de la interferometría consiste en combinar las ondas captadas por distintos telescopios de tal forma que parezca que proceden de un único espejo gigante, que estaría, simplemente, limitado por ventanas que corresponden a la apertura de los telescopios.

Para ello se utilizan líneas de retraso, especie de trombones ópticos formados por un reflector móvil, que permiten igualar el trayecto recorrido por los haces. Esta compensación debe ajustarse de forma permanente, ya que depende del ángulo de enfoque de los telescopios, que varía, a su vez, continuamente para compensar la rotación terrestre. También ha de ser esta compensación muy precisa, comparable a la calidad de un espejo astronómico, es decir, del orden de una centésima de micrometro.

Así se cumplen las condiciones que hacen que los dos haces procedentes de la misma fuente interfieran. La interferencia produce franjas cuya periodicidad depende de la distancia que separa los telescopios, y cuyo contraste depende de la ampli-

tud del objeto luminoso. Su medición permite determinar la componente espectral del objeto para una frecuencia espacial particular. De la misma forma que un sonido puede ser reconstituido a partir de sus componentes espectrales sonoras, una imagen puede ser reconstituida por la combinación de sus componentes espectrales espaciales. La obtención de una imagen final requiere por consiguiente la combinación, por medio de un tratamiento de la señal complejo, de un gran número de observaciones realizadas a diferentes distancias entre telescopios.

La resolución angular límite está determinada por la dimensión del espejo virtual que la combinación de los dos haces viene a realizar, es decir, por la distancia máxima que separa los telescopios y no ya por la dimensión de la apertura de cada telescopio. Está claro que las técnicas interferométricas, si bien permiten una resolución angular muchísimo mayor, se cobran su precio en tiempo de observación. No compiten directamente con la observación tradicional, ni con la óptica adaptativa, y quedan reservadas para la observación de objetos seleccionados con sumo cuidado.



8. PRINCIPIO DE LA INTERFEROMETRIA OPTICA. Los haces de dos telescopios que observan el mismo objeto se combinan en una estación externa. La diferencia ΔL entre los trayectos recorridos por los dos haces es compensada por las líneas de retraso, de tal forma que los haces parecen proceder de dos aperturas colocadas en un espejo cuyo diámetro sería igual a la distancia entre los dos haces. El sistema se comporta como un filtro de frecuencias espaciales, donde la frecuencia seleccionada viene determinada por la distancia entre los haces. La obtención de una imagen correcta requiere la combinación de varias "imágenes" filtradas, obtenidas con parejas de telescopios colocados en distintas posiciones. La combinación de dos haces procedentes de la misma fuente luminosa produce interferencias. El contraste de las franjas de interferencia depende de la extensión del objeto luminoso. Su medición determina la componente del objeto para una frecuencia espacial que corresponda a la distancia entre los haces. En un interferómetro astronómico, la obtención de una imagen final requiere la combinación, a través de un proceso de tratamiento de la señal complejo, de un gran número de observaciones obtenidas a distintas distancias entre los telescopios.

En proceso de experimentación se encuentran varios interferómetros que utilizan pequeños telescopios, y otros, que se apoyan en telescopios intermedios de uno a dos metros, se hallan en fase de construcción. Casi todos los telescopios de muy gran tamaño de la nueva generación han sido pensados para que se los utilice con técnicas interferométricas.

En el caso particular del VLT, el modo interferométrico ha sido, desde el principio, prioritario. Con una distancia entre los telescopios más separados que supera los 100 metros, el VLT proporcionará una resolución superior a una milésima de segundo de arco, 500 veces mejor que las mejores observaciones tradicionales, sujetas a la turbulencia atmosférica. El telescopio Keck de diez metros tendrá, dentro de unos años, un hermano gemelo. El conjunto, al que se unirán varios telescopios auxiliares menores, ofrecerá una resolución comparable a la del VLT. La carrera hacia la alta resolución angular ha empezado. No cabe duda de que constituirá la mayor apuesta de la astronomía del año 2000.

Los emplazamientos: la Antártida, nueva frontera

La corrección de los efectos de la turbulencia atmosférica es tanto más fácil y perfecta cuanto más reducida sea la turbulencia. La calidad del emplazamiento sigue siendo, pues, de importancia capital a pesar de los progresos realizados en la superación de las restricciones propias de la observación terrestre. Durante los diez últimos años, la utilización de telescopios de muy alta calidad instalados en lugares excelentes ha permitido una mejor comprensión de las causas de degradación de las imágenes y, en particular, de los efectos térmicos parásitos creados por el entorno inmediato del telescopio y por las capas bajas de la atmósfera. Sacando partido de estos progresos, los nuevos instrumentos explotan a fondo las cualidades de los mejores emplazamientos gracias a un control es-

tricto de las condiciones térmicas imperantes en las instalaciones y en la infraestructura local.

A las características clásicas que guiaban la selección de un emplazamiento, tales como la capa de nubes, la transparencia de la atmósfera, vientos moderados, turbulencia atmosférica débil, ausencia de contaminación luminosa que produzca luz parásita, etc., hay que añadir ahora el contenido en vapor de agua de la atmósfera, que se convierte, gracias a los desarrollos recientes en el infrarrojo, en un factor preponderante. Por otro lado, la urbanización, industrialización y contaminación constituyen tantas amenazas, que hacen que el número de buenos emplazamientos astronómicos sea muy reducido.

Los mejores lugares conocidos parecen ser Hawai y el norte de Chile, y, en menor medida, las islas Canarias. Algunas altas mesetas de Asia central podrían también esconder sitios excelentes. El emplazamiento de Mauna Kea, en la isla de Hawai, es verdaderamente notable. Se trata de un antiguo volcán situado a 4200 metros de altitud y aislado, puesto que está en medio del océano Pacífico. Un gran número de telescopios de distintos tamaños están ya instalados allí, entre ellos el telescopio franco-canadiense de 3,6 metros.

El desierto de Atacama, en el norte de Chile, sobresale también por sus condiciones climáticas, régimen de nubes casi excepcional y una humedad atmosférica muy baja. Se ha identificado y seleccionado un emplazamiento en concreto para el proyecto VLT: el monte Paranal, a 150 kilómetros al sur de Antofagasta, importante puerto minero en la desolada costa septentrional de Chile. Su altitud es sólo de 2650 metros; pero, gracias a una capa de inversión muy estable que las frías aguas del océano Pacífico mantienen, la capa de nubes queda "contenida" a baja altitud. Por encima de dicha capa de inversión, la condiciones de claridad y de estabilidad de la atmósfera son excelentes y muy próximas a las de Hawai. La altura moderada del Paranal evita tempestades de nieve y otros inconvenientes climáticos, al tiempo que ofrece, pese a lo aislado del lugar, condiciones de vida próximas a las normales. De esta forma los costes de explotación se reducen un tanto.

Que se piense en el continente antártico como lugar propicio a la observación astronómica puede parecer increíble. Sin embargo, aunque la costa está sometida a condiciones climáticas poco favorables, el interior presenta características que potencialmente lo convierten en un emplazamiento astronómico único. La meseta antártica central está a una altura comprendida entre los 3000 y 4000 metros. Su atmósfera es sumamente seca y muy transparente a las longitudes de onda infrarrojas y milimétricas, ventanas espectrales que han estado, hasta ahora, abiertas sólo en el espacio. El largo invierno austral permite una observación continua mucho más larga que una noche habitual. Y lo que es más sorprendente: esa meseta continental goza de muy poca nubosidad, de una atmósfera sumamente tranquila y de vientos muy moderados, lo que lleva a pensar que la calidad de las imágenes sería allí mejor que en cualquier otro lugar terrestre. La temperatura, inferior a –50 grados durante el invierno, plantea numerosos problemas técnicos y logísticos. Sin embargo, a los astrónomos no se les ha escapado que un telescopio "irradia" en el infrarrojo mucho menos a baja temperatura, es decir, que su ruido térmico de fondo, perturbador de la señal estelar, sería más débil en tierra tan fría, con lo que los resultados mejorarían.

Como se puede ver, a la astronomía terrestre del año 2000 no le faltan ni imaginación ni desafíos a los que enfrentarse.



9. MONTE PARANAL, futuro emplazamiento del VLT. Este emplazamiento está ubicado a 150 kilómetros al sur de Antofagasta, a 2650 metros de altitud, en una región de aspecto lunar, prácticamente exenta de precipitaciones y desprovista de cualquier forma de vida animal o vegetal. Allí, las condiciones meteorológicas son excepcionales: más del 90 por ciento de las noches son claras y favorables a la observación astronómica. La humedad es, en general, inferior al 20 por ciento, lo cual hace que el lugar sea muy propicio para las observaciones en los campos infrarrojo y milimétrico. La total ausencia de cualquier fuente de agua en las proximidades o en el subsuelo plantea problemas logísticos delicados; el agua necesaria para la vida de las 100 personas que se prevé habrá allí será transportada en camión. La cumbre será recortada en unos 30 metros y aplanada, de manera que quede una plataforma de 150 metros de ancho, necesaria para la instalación del VLT. La vista muestra el campamento provisional de las empresas encargadas de preparar el emplazamiento. Se puede distinguir en la ladera de la montaña el principio de las operaciones de nivelado.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ADVANCED TECHNOLOGY OPTICAL TELESCOPES IV, en *SPIE*, vol. 1236, febrero de 1990.

AMPLITUDE AND INTENSITY SPATIAL INTERFEROMETRY, en *SPIE*, vol. 1237, febrero de 1990

JOURNAL OF OPTICS, en *Nouvelle revue d'optique*, vol. 22, nº. 2, marzo-abril de 1991. (Número especial dedicado al VLT.)

INTERFEROMETRIE, L'UNIVERS RECONSTITUE. L. Koechlin, en *Ciel et Espace*, febrero de 1992.

PROGRESS IN TELESCOPE AND INSTRUMENTATION TECHNOLOGIES. Dirigido por M. H. Ulrich, ESO Garching, abril de 1992.

Audición binaural

La investigación experimental acometida con lechuzas nos revela los mecanismos de que se vale el cerebro para combinar las señales acústicas procedentes de uno y otro lado de la cabeza y forjar una percepción espacial única

Masakazu Konishi

¿Por qué tenemos dos oídos? Después de todo, oiríamos cabalmente con uno solo. Mas, para determinar la dirección exacta de donde procede un sonido —sea el llanto del bebé o el ladrido del perro—, sí se requieren ambos. En el proceso de fusión binaural, el cerebro compara la información recibida de cada oído y traduce luego las diferencias en una percepción unificada de un sonido único que viene de una región específica del espacio.

Los indicadores espaciales extraídos por el cerebro humano, se ha demostrado, son las diferencias en el tiempo de llegada y en la intensidad de las ondas sonoras que llegan a los oídos desde un foco dado, diferencias que se deben a la distancia entre éstos. Cuando un sonido procede de un punto situado directamente ante nosotros, las ondas llegan a los oídos al mismo tiempo y ejercen una fuerza igual en las superficies receptoras, que pasan la información al cerebro. Pero si un sonido emana, por ejemplo, de la izquierda del centro, las ondas alcanzarán el oído derecho con un ligero retraso con respecto al izquierdo; también serán algo menos intensas en el derecho porque, a medida que viajan hacia el oído más distante, una fracción de las ondas será absorbida o desviada por la cabeza.

El uso que el cerebro hace de las disparidades en la sincronía y en la intensidad se evidencia palmariamente si enviamos tonos por separado a cada oído sirviéndonos de auriculares. En vez de percibir dos señales distintas, oímos una señal (un fantasma) que se origina en algún lugar del interior o del exterior de la cabeza. Si los estímulos que se presentan a los oídos poseen igual intensidad y se emiten a la vez, percibimos un sonido que surge del centro de la cabeza. Si apagamos el volumen en un oído, o si retrasamos en éste la recepción del mismo, la fuente sonora parece trasladarse en la dirección del oído opuesto.

Desde hace años se conocía ya ese fenómeno. Lo que no está tan claro es el modo en que el cerebro consigue detectar variaciones en la temporización y la intensidad, así como la forma en que combina la información resultante en una percepción espacial unificada. Mi equipo del Instituto de Tecnología de California lleva 15 años enfrascado en la resolución de esas cuestiones, estudiando el comportamiento y el cerebro de la lechuza común *(Tyto alba)*. Hemos sacado a la luz casi todos los pasos del proceso computacional en estas aves. Y hemos comprobado que el cerebro de la lechuza no combina a la vez todas las señales aurales relacionadas con la localización, sino que opera a través de una sorprendente serie de etapas. La información acerca de la temporización y la intensidad se procesa por separado en rutas paralelas que convergen sólo al final de esos caminos. Es verosímil que los seres humanos y otros mamíferos consigan la fusión binaural de una manera muy parecida.

Mi interés por los fundamentos nerviosos de la localización sonora en las lechuzas arranca de 1963, cuando le oí a Roger S. Payne, que podían cazar un ratón en plena oscuridad, guiadas sólo por las señales acústicas. Tres años después, en Princeton, comprobé por mí mismo la refinada capacidad aural de las lechuzas con los tres ejemplares que me proporcionó un ornitólogo aficionado. Introduje una de ellas en una habitación de cerrada oscuridad donde había instalado una cámara de vídeo sensible a la radiación infrarroja: eran asombrosas la velocidad y la exactitud con la que volvía su cabeza hacia cualquier ruido. Esa respuesta me iba a valer para descubrir si el ave emplea la fusión binaural para localizar sonidos. En caso afirmativo, el estudio de su cerebro ayudaría a dilucidar de qué modo se obtiene tal fusión.

Los trabajos de mi laboratorio corroborarían aquellas intuiciones. Ya en las primeras investigaciones, Eric I. Knudsen y yo obtuvimos pruebas indirectas de que las lechuzas, como los seres humanos, deben mezclar la información procedente de ambos oídos para localizar un sonido. Cuando le tapábamos un oído, el ave volvía la cabeza en respuesta al ruido procedente de un altavoz, pero no localizaba a éste.

A principios de los ochenta, demostré con Andrew Moiseff que la lechuza extraía información direccional de las disparidades en la temporización y la intensidad de las señales que llegan a los dos oídos, lo que técnicamente se conoce como diferencias interaurales de tiempo y diferencias interaurales de intensidad. Medimos así las diferencias que surgían cuando desplazábamos un altavoz a lo largo de la superficie de un globo imaginario alrededor de su cabeza. Los micrófonos instalados en los oídos de la lechuza transmitían las señales que alcanzaban cada oído a un instrumento que medía el tiempo de llegada y el volumen. Al mover lentamente el altavoz desde la línea media de la cara (ángulo cero)

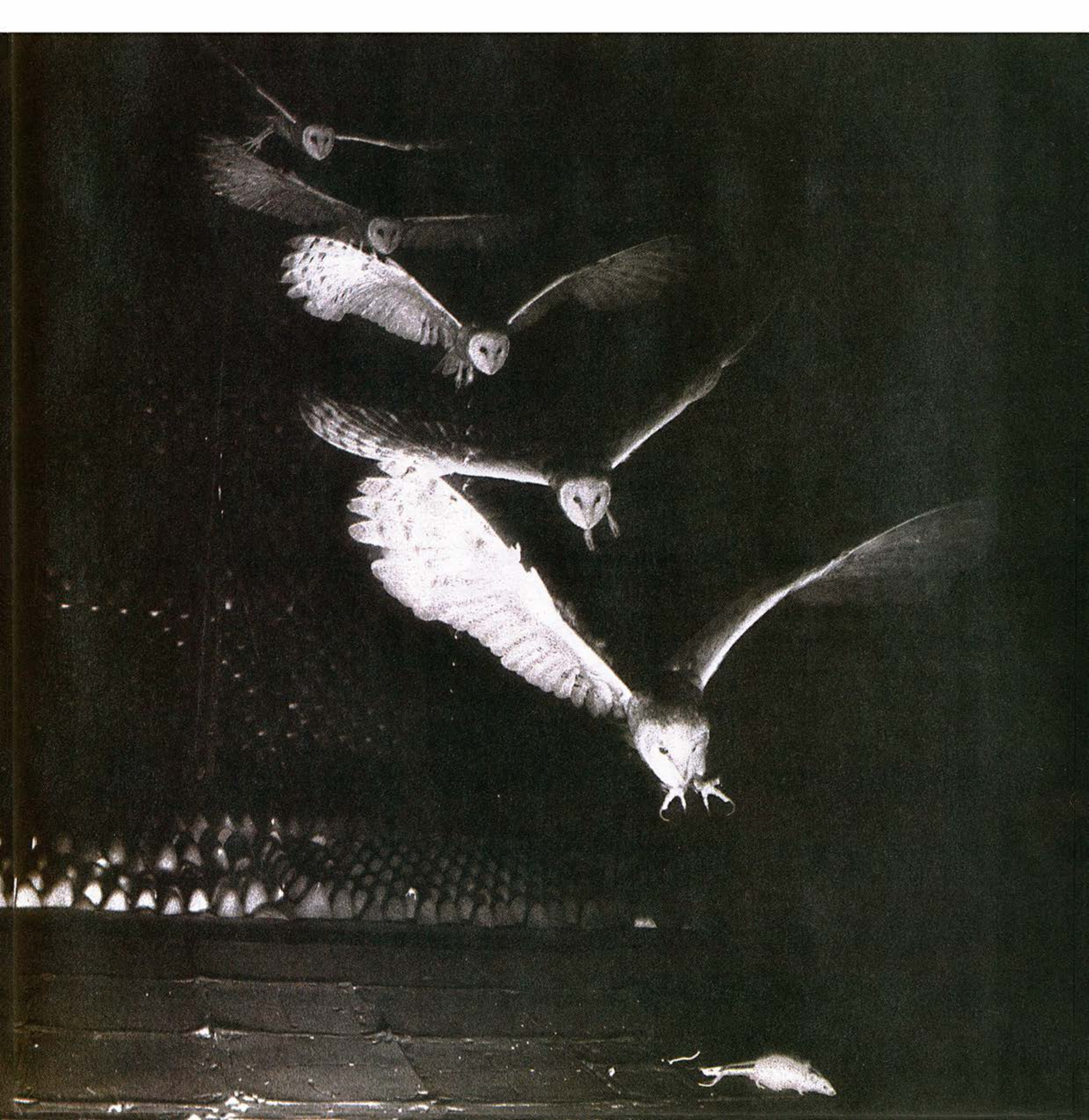
MASAKAZU KONISHI enseña biología del comportamiento, desde 1975, en el Instituto de Tecnología de California, tras pasar por la Universidad de Princeton, donde estudió la audición y la vocalización en aves canoras, así como la localización de sonidos en lechuzas.

1. LECHUZA ABATIENDOSE sobre la presa; la localiza en la oscuridad mediante el oído. Determina la trayectoria apropiada para el vuelo tras comparar las diferencias en la temporización y la intensidad de los sonidos que llegan a sus dos oídos. Un estroboscopio de infrarrojos que destellaba cinco veces por segundo permitió fotografiar al ave en acción.

hasta los 90 grados a la izquierda o a la derecha, la diferencia en el tiempo de arribada a los dos oídos aumentaba de manera sistemática. Estos resultados se parecían a lo observado en la investigación con humanos.

En contraste con lo que ocurre en humanos, la diferencia de intensidad no variaba mucho cuando el altavoz se movía en el sentido horizontal; pero sí aumentaba cuando el altavoz se desplazaba más allá o más acá del nivel de los ojos, al menos cuando el sonido portaba ondas de frecuencias superiores a tres kilohertz, o 3000 ciclos por segundo. Payne atribuyó esos cambios de intensidad a una asimetría en la disposición de los oídos de la lechuza: el izquierdo está por encima del nivel de los ojos y se dirige hacia abajo, mientras que el oído derecho está por debajo y apunta hacia arriba. De donde resulta que el oído izquierdo es más sensible a los sonidos que proceden de abajo, y el derecho es más sensible a los que provienen de arriba.

Comprobado que el tiempo y la intensidad de llegada suelen diferir para uno y otro oído, podíamos averiguar hasta qué punto la lechuza recurre a combinaciones específicas de disparidades para localizar el origen de un sonido. Le aplicaríamos unos auriculares y enviaríamos ruidos, por separado, a cada órgano modificando tiempo, intensidad o ambos. Comprobaríamos si, ante determinadas combinaciones de tiempo e intensidad, el ave mueve la cabeza en una dirección específica. Se resistieron a los auriculares hasta que, por



fin, pudimos insertarles unos prototipos minúsculos en el canal auditivo.

Diseñamos también un método para medir la dirección del giro de la cabeza, determinando a la vez las componentes horizontal y vertical de la respuesta a cada conjunto de estímulos; en su confección nos basamos en la técnica de bobina de búsqueda que Gary G. Blasdel había diseñado años antes. Colocamos dos carretes de hilo de cobre, perpendiculares entre sí, en la cabeza del animal, situada ésta entre dos bobinas grandes por las que pasaba corriente eléctrica. Cuando la cabeza se movía, las bobinas inducían corriente en los carretes. Las variaciones en el flujo de corriente en los carretes revelaban los ángulos horizontal y vertical del giro de la cabeza.

2. DIFERENCIAS EN EL TIEMPO Y LA INTENSIDAD a las que un sonido alcanza los dos oídos de una lechuza; varían a medida que el origen del sonido se desplaza a lo largo de la superficie de un globo imaginario que se mueve alrededor de la cabeza del ave. Las diferencias en el tiempo localizan el sonido en el plano horizontal *(a)*; la diferencia aumenta 42 microsegundos por cada 20 grados que se mueve el origen del sonido *(b)*. Las diferencias en la intensidad localizan el sonido en el plano vertical *(c)*. El sonido por encima del nivel del ojo es más intenso en el oído derecho, según los niveles en decibelios que se indican *(d)*; por debajo del nivel del ojo, es más intenso en el oído izquierdo. Las diferencias varían con la frecuencia; en este caso se midieron para seis kilohertz. La combinación de los dos gráficos *(e)* define cada localización en el espacio. Cuando se expone a una lechuza a un par de diferencias determinado, gira rápidamente la cabeza en una dirección predecible *(fotografía)*.

La lechuza respondía pronta a las señales procedentes de los auriculares, como si le llegara ruido del exterior de la cabeza. Cuando el sonido en un oído precedía al de su órgano par, la cabeza giraba en la dirección del oído al que primero llegaba el sonido. Si manteníamos constante el volumen pero hacíamos llegar el sonido a un oído antes que al otro, giraba su cabeza en la dirección horizontal. Cuanto más retrasábamos la llegada del sonido al segundo oído, mayor era el giro.

A su vez, si variábamos la intensidad pero manteníamos constante la sincronización temporal, la lechuza tendía a mover su cabeza hacia arriba o hacia abajo. Si producíamos sonidos de suerte tal que temporización e intensidad de las señales llegadas al oído izquierdo difirieran de las del oído derecho, movía la cabeza horizontal y verticalmente. La verdad es que las combinaciones de sincronización interaural y de diferencias de intensidad que imitaran las combinaciones generadas por un altavoz en lugares determinados provocaban la orientación del ave hacia esas fuentes emisoras. Podíamos, pues, afirmar con seguridad que el cerebro de la lechuza mezcla realmente los datos sobre sincronización e intensidad para establecer las coordenadas horizontales y verticales de una fuente de sonido. Menos claro aparece el proceso mediante el cual la lechuza común calcula la distancia.

Para averiguar de qué modo el cerebro realiza la fusión binaural, debíamos examinar el propio órgano. Nuestro plan de trabajo se basaba en los estudios que Knudsen y yo habíamos acometido años antes, cuando identificamos las células que son, lo sabemos ahora, cruciales para la localización sonora. Llamadas neuronas específicas de espacio, sólo reaccionan ante estímulos acústicos que se originan a partir de ciertos campos receptivos, o zonas restringidas del espacio. Estas neuronas residen en el núcleo externo, región del cerebro situada dentro del área auditiva del mesencéfalo (equivalente al colículo inferior de los mamíferos). Tomadas en su conjunto, las neuronas específicas de espacio del núcleo externo

izquierdo dibujan un mapa primariamente del lado derecho del espacio auditivo (amplia región desde donde se detectan los sonidos); las del núcleo externo derecho forman un mapa primariamente de la mitad izquierda del espacio auditivo, aunque existe cierto solapamiento.

Para identificar las células específicas de espacio aplicamos un microelectrodo en determinadas neuronas cerebrales de un ave anestesiada. Manteniendo allí el electrodo, movíamos un altavoz por la superficie de nuestro globo imaginario alrededor de la cabeza de la lechuza. Algunas neuronas sólo disparaban impulsos si el ruido emanaba de un campo receptivo particular. Por ejemplo, en una lechuza que mirara hacia delante, una neurona específica de espacio respondía sólo si se colocaba un altavoz en un campo receptivo que se extendía aproximadamente 20 grados a la izquierda de la línea de visión de la lechuza y unos 15 grados por encima o por debajo del mismo. Otra neurona distinta se excitaba cuando el altavoz se transfería a otra parte del globo.

Pero, ¿cómo obtenían información direccional estas neuronas? ¿Procesaban por sí mismas las señales pertinentes? ¿O se extraían las señales y sufrían cierta combinación en una o más estaciones de tránsito (centros de retransmisión) del cerebro, tras lo cual los resultados seguían cadena arriba?

Para contestar a tales cuestiones, Moiseff y yo nos propusimos realizar algunos experimentos de emisión de sonidos a través de los auriculares. Pero debíamos antes tener la seguridad de que las señales capaces de excitar determinadas neuronas específicas de espacio imitaban realmente las diferencias interaurales en tiempo e intensidad que provocaban el disparo neuronal en condiciones menos artificiales (por ejemplo, cuando un sonido emanaba de un punto en el campo receptivo de la neurona). Dimos con el estímulo que necesitábamos, en una serie de pruebas donde producíamos sonidos a través de los auriculares y controlábamos la respuesta de neuronas concretas, mediante la acostumbrada aplicación del microelectrodo en las células o en su vecindad. Tal como esperábamos, las células respondían a combinaciones específicas de señales. Además, los conjuntos de diferencias de sincronización e intensidad que provocaban las descargas fuertes por parte de neuronas específicas del espacio correspondían exactamente a las combinaciones que hacían que una lechuza girara su cabeza hacia un punto del campo receptivo de la neurona. Esta congruencia confirmaba la idoneidad del enfoque propuesto.

3. EL CEREBRO de la lechuza emplea neuronas específicas del espacio, sitas en el núcleo externo del área auditiva del mesencéfalo, para cartografiar regiones precisas *(rectángulos sobre la esfera)*, denominadas campos receptores, en el espacio auditivo. Al investigar la manera como funcionan las neuronas específicas del espacio, el autor y sus colegas descubrieron el procedimiento escalonado que conduce a la activación de dichas neuronas.

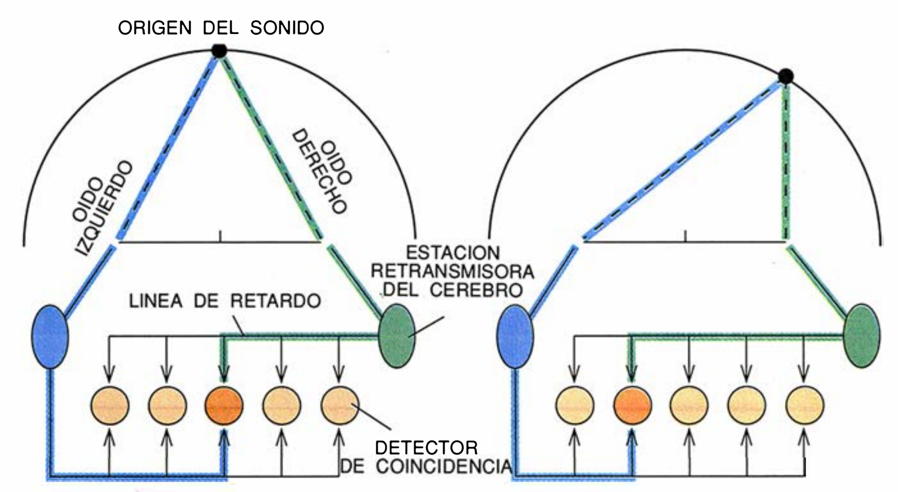
En aquellos esfuerzos iniciales por reconstruir los pasos a través de los cuales las interconexiones del cerebro consiguen la fusión binaural, Moiseff y yo nos empeñamos en descubrir las neuronas sensibles a las diferencias interaurales de tiempo o de intensidad en las estaciones de tránsito, que retransmiten las señales desde el nervio auditivo hasta el mesencéfalo. Esas investigaciones, finalizadas en 1983, sugerían que determinadas estaciones sólo eran sensibles a señales de sincronización, mientras que otras lo eran exclusivamente a señales de intensidad. Parecía que el cerebro funcionaba como un ordenador en paralelo, que procesara información sobre la temporización y la intensidad a través de circuitos separados.

Había que buscar otras pruebas del procesamiento en paralelo. Con la colaboración de Terry T. Takahashi empezamos por examinar el funcionamiento de las estaciones de tránsito más bajas del cerebro: los núcleos cocleares. Cada hemisferio cerebral posee dos: el núcleo magnocelular y el núcleo angular. En las rapaces nocturnas, como en las demás aves, cada fibra del nervio auditivo (es decir, cada axón emisor de señales que arranca de una neurona del oído) se divide en dos ramas después de abandonar el oído. Una rama penetra en el núcleo magnocelular; la otra en el núcleo angular.

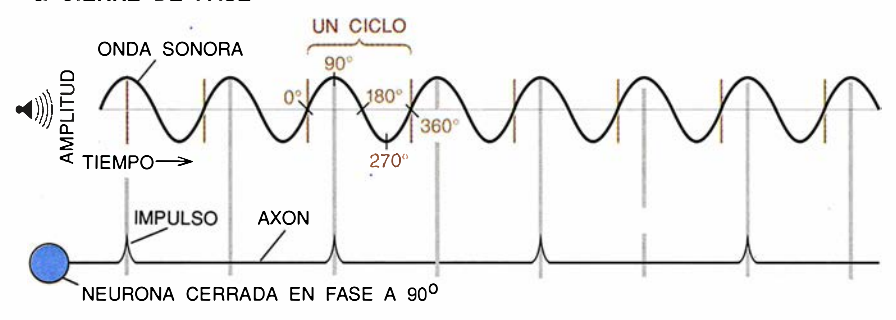
Nos preguntábamos de qué manera se comportarían las neuronas específicas de espacio si impedíamos que las células nerviosas descargaran en uno de los dos núcleos cocleares. Inyectamos una ínfima cantidad de un anestésico local en uno de los dos núcleos, el magnocelular o el angular. Los resultados fueron espectaculares: la droga en el núcleo magnocelular alteró la respuesta de las neuronas específicas del espacio a las diferencias de tiempo interaurales, sin afectar la respuesta a las diferencias de intensidad. Lo contrario ocurrió cuando el núcleo angular recibió el anestésico. Estaba claro que la temporización y la intensidad se procesan por separado, al menos en las estaciones de tránsito cerebrales más inferiores; las neuronas magnocelulares transmiten datos referidos al tiempo y las neuronas angulares transmiten datos relativos a la intensidad.

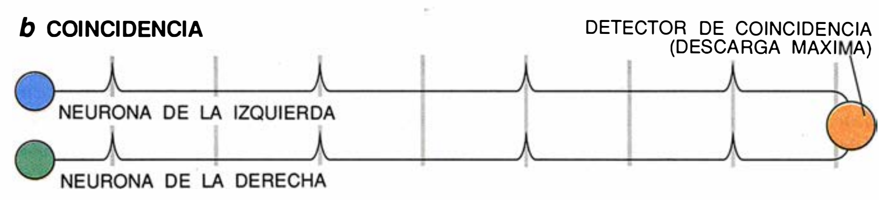
Ante tales resultados, pedí a Takahashi que cartografiara las trayectorias de las neuronas que ponen en conexión las estaciones de tránsito del sistema auditivo. Su investigación reveló, por fin, que existen dos rutas separadas que se extienden desde los núcleos cocleares hasta el mesencéfalo. La anatomía respaldaba la hipótesis del procesamiento en paralelo.

Mientras Takahashi se enfrascaba en su labor cartográfica, W. E. Sullivan y yo exploramos la manera en que los núcleos magnocelulares y angulares extraen la información relativa a la sincronización y a la intensidad de las señales que llegan procedentes del nervio auditivo. Recuérdese que la mayoría de los sonidos naturales están constituidos por varias ondas, dotada cada una de su propia frecuencia. Cuando las ondas alcanzan la membrana basilar del oído, esta superficie receptora comienza a vibrar, aunque no lo hace

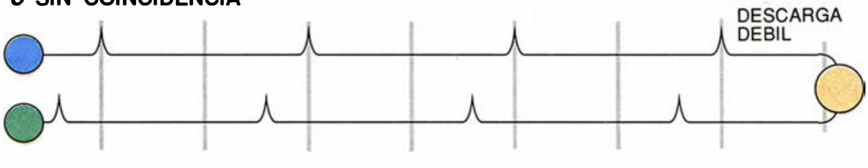


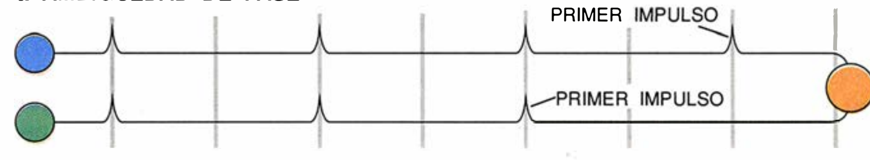
4. MODELO DE CIRCUITO para la detección de diferencias de tiempo interaurales, según fue sugerido en 1948. Los detectores de coincidencia reciben información procedente de ambos oídos. Sólo se excitan cuando los impulsos de los dos lados llegan simultáneamente a través de fibras que funcionan como líneas de retardo. El detector que responde *(círculo más oscuro)* cambia conforme se va modificando el punto de origen del sonido: desde una posición frontal *(izquierda)* hacia el lado *(derecha)*. El cerebro de la lechuza funciona de forma muy parecida a lo propuesto por el modelo.











5. ONDA SONORA DE UNA SOLA FRECUENCIA. Provoca que las neuronas sensibles a la misma disparen series de impulsos en un ángulo de fase determinado *(a)*. Los detectores de coincidencia del cerebro de la lechuza disparan con más fuerza cuando los impulsos generados en el mismo ángulo de fase alcanzan simultáneamente los detectores *(extremo derecho en b)*. Los detectores pueden también disparar, pero más débilmente, cuando los trenes de impulsos que llegan hasta ellos son ligeramente asincrónicos *(c)*. En lo que se conoce por ambigüedad de fase, el disparo máximo puede darse si un sonido que llega a un oído se retrasa o se adelanta en un ciclo completo con respecto a otro tiempo de transferencia que produce coincidencia *(d)*.

de una manera uniforme. Distintas partes de la membrana vibran al máximo en respuesta a frecuencias particulares. A su vez, las neuronas que están conectadas a las áreas que vibran al máximo (y, con ello, se hallan "sintonizadas" a frecuencias específicas), son excitadas. Estas neuronas propagan impulsos a lo largo del nervio auditivo, hasta el cerebro.

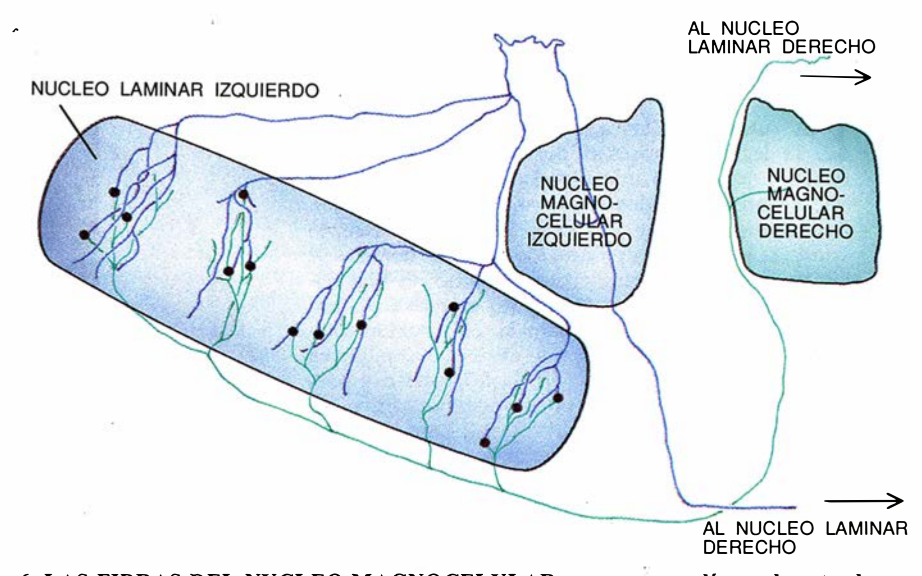
Descubrimos nosotros, y otros investigadores también, que la intensidad de una onda sonora de una frecuencia determinada llega al cerebro, desde el oído, vehiculada por la cadencia de disparo de las neuronas auditivas sintonizadas con dicha frecuencia. Lo que parece intuitivamente obvio. Menos manifiesto resultaba nuestro hallazgo siguiente. Las neuronas del nervio auditivo también exhiben lo que se llama cierre de fase: se disparan en puntos característicos, o ángulos de fase, a lo largo de la onda sonora. Es decir, una neurona sintonizada a una frecuencia tenderá a excitarse, por ejemplo, cuando la onda se encuentra en la línea de base (cero grados), aunque no se dispara necesariamente cada vez que la onda alcanza esta posición. La neurona sintonizada a otra frecuencia tenderá a excitarse en un ángulo de fase distinto, verbigracia, cuando la onda se halla en su máximo (en el punto denominado 90 grados, que se encuentra a un cuarto del recorrido de un ciclo de onda completo de 360 grados), o alcanza algún otro punto específico. En ambos oídos, los impulsos producidos por neuronas sintonizadas a la misma frecuencia se cerrarán en el mismo ángulo de fase. Ahora bien, según el momento en que las señales estimulen a los oídos, el tren de impulsos generado en un oído puede retrasarse con respecto al tren de impulsos generado en el opuesto.

Hay células del núcleo magnocelular que exhiben cierre de fase. Pero son insensibles a la intensidad; los cambios en el volumen de un tono no afectan al ritmo de descarga. En cambio, pocas neuronas angulares muestran cierre de fase, aunque responden a variaciones de intensidad. Estos y otros resultados indican que la lechuza se apoya en los trenes de impulsos cerrados de fase reemitidos desde el núcleo magnocelular para medir las diferencias de tiempo interaural, y fía en el ritmo de impulsos que descarga el núcleo angular para evaluar las diferencias interaurales de intensidad. En su conjunto, pues, nuestros análisis de las estaciones de tránsito inferiores del cerebro establecieron que los núcleos cocleares sirven de fil-

tros que transmiten información sobre la temporización o la intensidad, pero no sobre ambas cosas a la vez.

Abordamos luego la exploración de las regiones superiores, con el propósito de descubrir la forma en que el cerebro manipula los datos de sincronización. Otros estudios, que se comentarán, se dirigían a la intensidad. Observamos así que, cuando los impulsos cerrados de fase inducidos por ondas sonoras de una sola frecuencia (un tono puro) abandonan el núcleo magnocelular de cada lado del cerebro, viajan hasta una segunda estación de tránsito: el núcleo laminar. Los impulsos procedentes de cada oído son transmitidos al núcleo del lado opuesto y del mismo lado de la cabeza. El núcleo laminar es, por tanto, el primer lugar donde la información procedente de ambos oídos se reúne en un solo lugar.

El problema general de la combinación cerebral de los datos relativos a la temporización permaneció en el terreno de las lucubraciones durante décadas. Lloyd A. Jeffress propuso en 1948 un modelo razonable, en el que las fibras nerviosas que transmiten señales relacionadas con el tiempo desde los oídos (líneas de retardo) varían en la celeridad con que transmiten las señales a estaciones de tránsito del cerebro. Acaban por converger en neuronas (detectores de coincidencia) que sólo se excitan ante la llegada simultánea de impulsos procedentes de ambos lados.



6. LAS FIBRAS DEL NUCLEO MAGNOCELULAR operan como líneas de retardo, y las neuronas del núcleo laminar actúan a modo de detectores de coincidencia en el cerebro de la lechuza. Cuando los impulsos que viajan por las fibras izquierdas *(azul)* y derechas *(verde)* alcanzan simultáneamente las neuronas laminares *(puntos negros)*, las neuronas se excitan intensamente.

Las señales que llegan a los oídos en momentos diferentes alcanzarán la coincidencia (arribarán al unísono a los detectores de coincidencia) si la suma del tiempo de tránsito de una onda sonora a un oído y el tiempo de viaje de los impulsos que emanan de este oído a un detector de coincidencia son iguales para ambos lados de la cabeza. Considérese un sonido que estimulara el oído izquierdo cinco microsegundos antes de llegar al derecho. Los impulsos de ambos oídos se encontrarían simultáneamente en un detector de coincidencia del hemisferio derecho si las líneas de retardo del oído izquierdo (el oído más cercano) prolongaran el tiempo de tránsito de los impulsos desde este oído a un detector de coincidencia en cinco microsegundos sobre el tiempo que tardarían los impulsos en atravesar las fibras desde el oído derecho.

Desde 1948, la investigación fisiológica de la excitación nerviosa en perros y gatos y los estudios anatómicos del cerebro de pollos han sugerido que el cerebro mide las diferencias interaurales relativas a la temporización mediante líneas de retardo y detección de coincidencia. En 1986 demostré con Catherine E. Carr que, en la lechuza, las fibras nerviosas procedentes de las neuronas magnocelulares funcionan como líneas de retardo, en tanto que las neuronas del núcleo laminar realizan funciones de detectores de coincidencia.

Pero el circuito de detección de la lechuza, igual que los de los mamíferos examinados, difiere algo del modelo de Jeffress. Las neuronas del núcleo laminar responden con la mayor intensidad a la coincidencia producida por determinadas diferencias de tiempo. Pero también responden, aunque con menos vigor, a las señales que no causan una coincidencia perfecta. El número de impulsos cae gradualmente a medida que la diferencia de tiempo interaural aumenta o disminuye desde el valor de coincidencia; es decir, hasta que las ondas que llegan a un oído se encuentran a 180 grados (un semiciclo completo) fuera de fase de la posición que produciría la coincidencia. En este punto, la descarga cesa. (Las neuronas también responden, en un nivel intermedio, a las señales que se dirigen a un solo oído.)

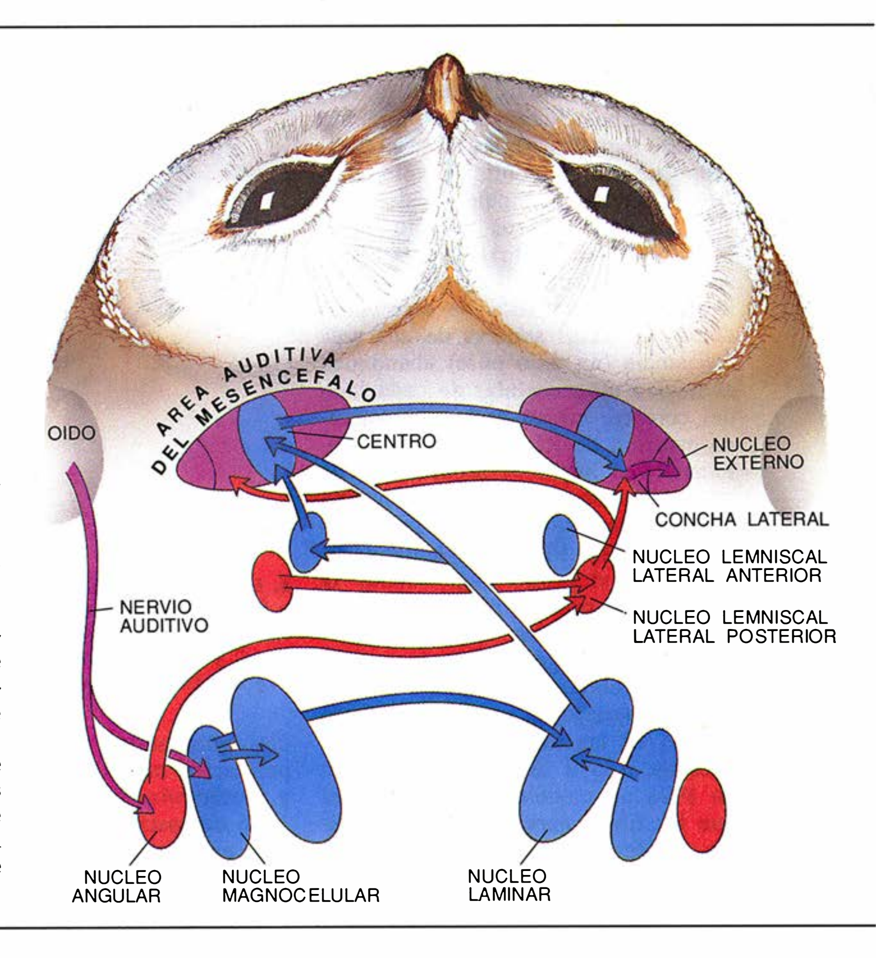
Así, pues, puede decirse que los detectores de coincidencia, en virtud de las líneas de retardo que los alimentan, son sensibilísimos a diferencias de tiempo específicas. Pero no son muy selectivos en lo que concierne al momento en que producen una respuesta máxima. Puede inducirse su excitación, con intensidad creciente, cuando la diferencia de fase aumenta más de 180 grados a partir del valor de coincidencia. Cuando el desplazamiento alcanza los 360 grados, el tiempo de llegada de las ondas sonoras en un oído se demora en la fracción que tarda una onda sonora en cerrar un ciclo. En esta situación, y con cada diferencia de 360 grados, los detectores de coincidencia serán reiteradamente alcanzados por una serie de impulsos sincrónicos y mostrarán su máxima excitación. Una misma neurona reacciona, pues, a más de una diferencia de tiempo.

Para su fortuna, la lechuza dispone de algún mecanismo que le resuelve tal "ambigüedad de fase" en niveles superiores y le ahorra confusiones. Ignoramos la forma en que consigue la resolución. Y aún hay otro misterio: la lechuza detecta diferencias de temporización interaurales muy pequeñas, del orden de 10 microsegundos (10 millonésimas de segundo), en tanto que un solo impulso persiste muchísimo más, unos mil microsegundos.

El resto de la ruta de la detección del tiempo es más directo. Determinada la diferencia de tiempo interaural producida por un sonido de una frecuencia dada, el detector de coincidencia del núcleo laminar de un lado del cerebro transmite el resultado hacia arriba, a estaciones superiores, entre ellas la región del centro del área auditiva del mesencéfalo en el lado opuesto de la cabeza. En consecuencia, las áreas superiores heredan del núcleo laminar no sólo la selectividad para las diferencias interaurales de frecuencia y de tiempo, sino también la ambigüedad de fase. A su vez, la información en el centro se envía

El circuito auditivo

Las rutas paralelas dispuestas en el cerebro de la lechuza procesan por separado la temporización *(azul)* y la intensidad *(rojo)* de los sonidos que llegan a los oídos *(esquema y diagrama de flujo)*. Ilustramos las vías del oído izquierdo, excepto donde la información procedente del oído derecho se les une; las estructuras cerebrales no se han dibujado a escala. El procesamiento empieza cuando el núcleo magnocelular separa la información relativa al tiempo y a medida que el núcleo angular va extrayendo información sobre la intensidad a partir de las señales emitidas por el nervio auditivo. La ruta temporal se dirige al núcleo laminar, que recibe información de los núcleos magnocelulares derecho e izquierdo. Las neuronas del núcleo laminar están conectadas a dos estaciones superiores: el núcleo lemniscal lateral anterior y el centro del área auditiva del mesencéfalo. Mientras tanto, la información sobre la intensidad viaja desde el núcleo angular hasta el núcleo lemniscal lateral posterior, donde se reúne la información procedente de los dos oídos. Las rutas temporal y de intensidad se unen finalmente en la concha lateral del área auditiva del mesencéfalo. De allí se prolongan hasta el núcleo externo, que alberga las neuronas específicas de espacio y constituye la postrera estación en el procesamiento de las señales acústicas. Si se considera en términos de un algoritmo *(derecha)*, estas neuronas encabezan la jerarquía: representan los resultados finales de todos los cómputos desarrollados en la red.



a un área inmediata (la denominada concha del área auditiva del mesencéfalo) en el lado opuesto del cerebro, donde se combina con la información relativa a la intensidad.

Conocemos peor el funcionamiento de la ruta relativa a la intensidad que converge con la ruta relativa al tiempo en la concha. A diferencia del núcleo magnocelular, que se dirige hacia arriba un solo nivel, hasta el núcleo laminar, el núcleo angular, que detecta la intensidad, se encamina directamente a muchas estaciones superiores (con excepción del núcleo externo); entre ellas, el núcleo lemniscal lateral posterior.

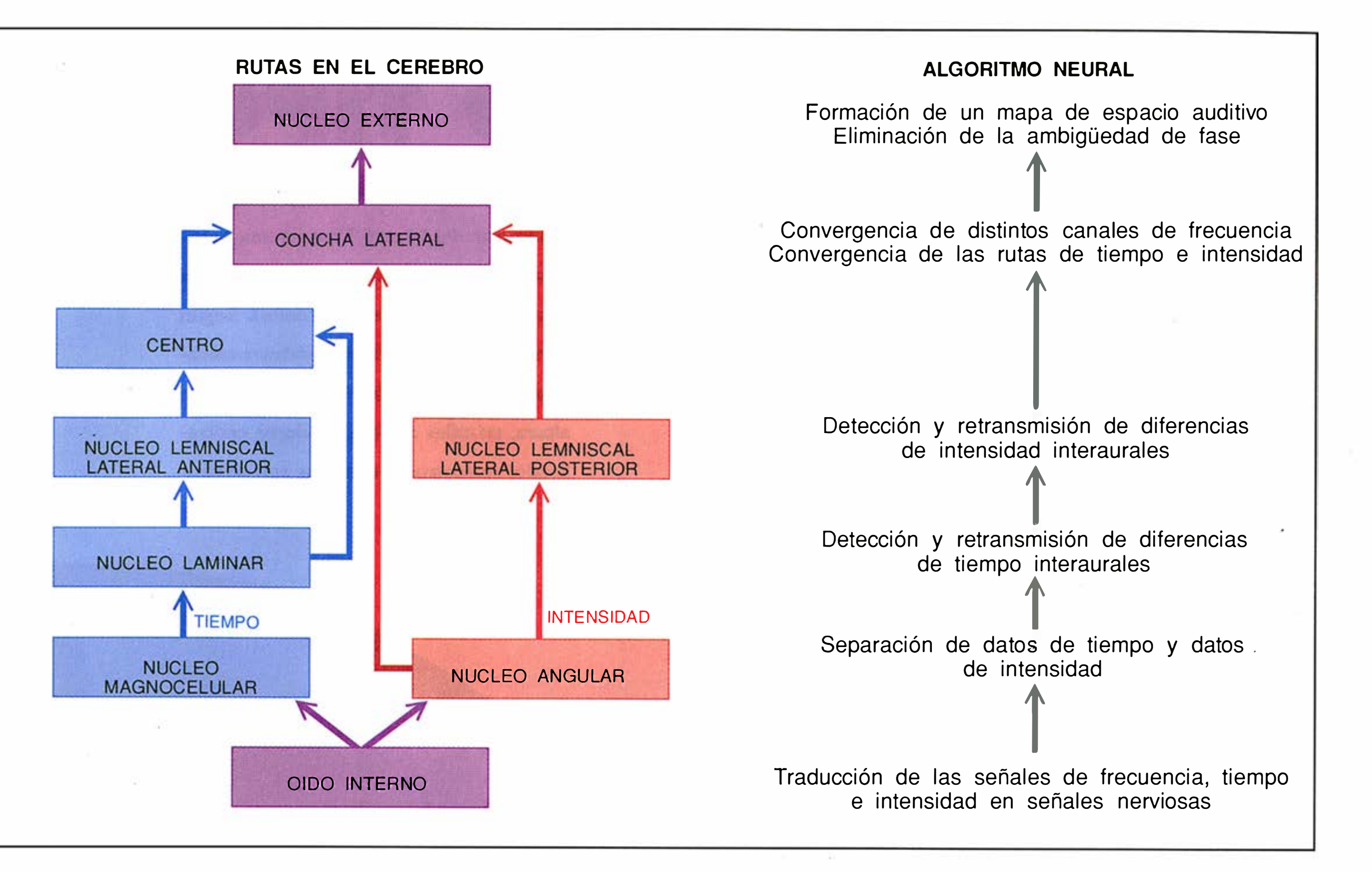
El núcleo lemniscal lateral posterior de un lado de la cabeza recibe información directa del núcleo angular del lado opuesto, lo que no obsta para que perciba diferencias de intensidad entre los dos oídos, aunque en realidad sea la estación más inferior del cerebro la que lo haga. El área lemniscal puede detectar tales diferencias porque su gemela (en el hemisferio cerebral opuesto) le envía información procedente del otro núcleo angular. En esencia, las neuronas del núcleo lemniscal de un lado de la cabeza reciben señales excitadoras procedentes del oído del lado opuesto, y reciben señales inhibidoras del oído del mismo lado. El equilibrio entre señales excitadoras e inhibidoras determina la cadencia de disparo de las neuronas lemniscales.

Hemos observado, asimismo, que las neuronas del núcleo lemniscal lateral posterior varían sistemáticamente en las diferencias de intensidad que provocan su excitación máxima. Geoffrey A. Manley y Christine Köppl demostraron que las neuronas del fondo del núcleo izquierdo responden enérgicamente cuando el sonido es mucho más intenso en el oído derecho y que las de la parte superior del núcleo prefieren el sonido más intenso en el oído izquierdo. Esta disposición permite que las neuronas específicas del espacio determinen si un ruido procede de la parte superior o de la inferior del nivel del ojo. Sin embargo, todavía no se ha establecido el proceso mediante el cual las neuronas específicas del espacio convierten señales procedentes del núcleo lemniscal lateral posterior en coordenadas verticales.

La siguiente estación superior es la concha lateral del área auditiva del mesencéfalo; las neuronas del núcleo lemniscal posterior de cada lado del cerebro envían señales a la concha en ambos hemisferios. En la concha, la mayoría de las neuronas responden enérgicamente a las diferencias interaurales de intensidad y de sincronización generadas por sonidos en un estrecho espectro de frecuencias. Pero esa estación no proporciona a la lechuza la información suficiente para asegurar la localización sonora precisa, porque persiste la ambigüedad de fase.

La ambigüedad desaparece en el núcleo externo, sede de las neuronas específicas de espacio. Estas neuronas, sintonizadas con la frecuencia, reciben datos sobre temporización e intensidad desde muchos canales de frecuencia. Esta convergencia suministra la información necesaria para que el cerebro seleccione las coordenadas correctas de una fuente sonora. Así, pues, la selectividad de las neuronas específicas de espacio proviene del procesamiento en paralelo de los datos sobre tiempo e intensidad y de la combinación de los resultados en la concha y en el propio núcleo externo.

Desconocemos todavía cuántas neuronas específicas de espacio deben activarse para que la lechuza gire su cabeza hacia una fuente sonora. Pero sabemos que hay neuronas individuales que pueden transmitir los datos espaciales necesarios. Este hecho pone en tela de juicio el



punto de vista de algunos investigadores, según el cual las neuronas individuales no pueden representar una información tan compleja, y que las percepciones sólo surgen cuando grupos enteros de células, que no revelan nada por sí mismas, descargan impulsos colectivamente siguiendo un patrón determinado.

En su conjunto, nuestras exploraciones neurológicas han dilucidado gran parte del algoritmo, o protocolo escalonado, mediante el cual el cerebro de la lechuza consigue la fusión binaural. Presumiblemente, los humanos seguimos en esencia el mismo algoritmo (aunque pudieran diferir algunas de las estaciones de procesamiento). Recuérdense, por ejemplo, las pruebas que abonan la idea de que los mamíferos se basan en líneas de retardo y en la detección de coincidencia para localizar sonidos.

Podemos extrapolar todavía más. El otro algoritmo neural para una tarea sensorial descifrado en detalle similar es el que sigue un pez eléctrico del género *Eigenmannia*. El equipo de Walter F. Heiligenberg ha descubierto las reglas que permiten a los miembros de esta especie determinar si sus ondas eléctricas son de frecuencia superior o inferior a las de otros *Eigenmannia* cercanos. (En respuesta, un pez puede alterar la frecuencia de la onda que emite.) *Eigenmannia* se funda en rutas paralelas para procesar por separado la información sensorial recibida. La información de interés se procesa por etapas; las rutas paralelas convergen en una estación superior, y las neuronas de la cabeza de la jerarquía responden selectivamente a combinaciones precisas de señales. El algoritmo del pez se asemeja mucho al de la lechuza, aunque los problemas que se resuelven, los sistemas sensoriales implicados, los lugares de procesamiento en el cerebro y las especies son distintos. Las semejanzas sugieren que el cerebro sigue determinadas reglas generales para el procesamiento de la información que son comunes.

Carver A. Mead opina que el algoritmo de la lechuza podría enseñar algo a los diseñadores de circuitos integrados analógicos de silicio, los denominados circuitos IMGE (Integrados a Muy Gran Escala). En 1988, Mead y John Lazzaro construyeron un "circuito integrado de lechuza" que reproduce los pasos a través de los cuales el ave mide las diferencias interaurales de tiempo. El modelo, de unos 73 mm^2 de superficie, contiene sólo 64 fibras nerviosas auditivas en cada oído (muchas menos de las que realmente existen) y unas 21.000 líneas de retardo. (También tiene 200.000 transistores, sobre todo para regular las líneas de retardo.) Incluso en esta versión abreviada, el sistema nervioso electrónico ocupa mucho más espacio y energía que el biológico. Los ingenieros construyen circuitos integrados siguiendo principios tomados de la electrónica, la física y la química. La economía del circuito biológico sugiere que los principios naturales pueden ayudarles a proyectar circuitos integrados analógicos que consuman menos energía y ocupen menos espacio de lo habitual.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NEUROPHYSIOLOGICAL AND ANATOMICAL SUBSTRATES OF SOUND LOCALIZATION IN THE OWL. M. Konishi, T. T. Takahashi, H. Wagner, W. E. Sullivan y C. E. Carr en *Auditory function: Neurobiological bases of hearing*. G. M. Edelman, W. E. Gall y W. M. Cowan, eds. John Wiley. 1988.

A CIRCUIT FOR DETECTION OF INTERAURAL TIME DIFFERENCES IN THE BRAIN STEM OF THE BARN OWL. C. E. Carr y M. Konishi en *Journal of Neuroscience*, vol. 10, n.º 10, págs. 3227-3246, 1990.

THE NEURAL ALGORITHM FOR SOUND LOCALIZATION IN THE OWL. M. Konishi en *The Harvey Lectures*, serie 86, págs. 47-64, 1992.

Perfiles

John Horgan

PAUL KARL FEYERABEND: *El peor enemigo de la ciencia*

En un ensayo publicado en *Nature* en 1987, dos físicos se quejaban de que el escepticismo público hacia la ciencia no dejase de crecer. Atribuían esta corrosiva tendencia a cuatro filósofos que habían atacado las ideas tradicionales de verdad y progreso científico: Karl R. Popper, que propuso que las teorías nunca pueden ser probadas, sino tan sólo falsadas; Imre Lakatos, que sostenía que los científicos se niegan a aceptar pruebas que vayan contra sus teorías; Thomas S. Kuhn, que arguye que la ciencia es una actividad más política que racional; y Paul K. Feyerabend.

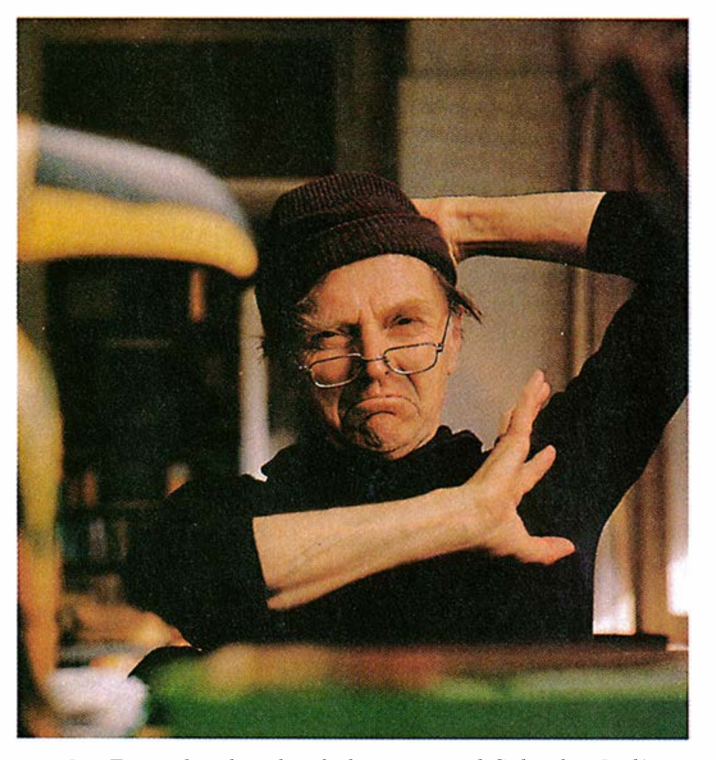
Distinguían a Feyerabend llamándolo "el peor enemigo de la ciencia en este momento". Las fotografías que acompañaban el ensayo parecían confirmar tal opinión. Popper, Lakatos y Kuhn mostraban una expresión sobria. Pero Feyerabend no: malicioso el guiño, las gafas colgándole de la punta de la nariz, estaba claro que tramaba algo realmente perverso.

Muchos años lleva Feyerabend, austriaco de nacimiento batallando contra lo que él llama "la tiranía de la verdad". Los científicos desarrollan y sostienen sus teorías irracionalmente. Según Feyerabend, no hay normas generales por las que establecer la verdad. "Todo vale", dice.

Ha puesto en pie de igualdad la ciencia, el vudú y la brujería. Ha comparado a los biólogos que experimentan con animales a los nazis. Ha hecho que la entrada que le toca en el *Quién es quién* termine así: "Los intelectuales destacados, con su celo por la objetividad, ... son criminales, no los liberadores de la humanidad".

Tras estas provocaciones se esconde un mensaje profundo: la tendencia humana a encontrar verdades absolutas, si bien noble, con frecuencia acaba en la tiranía intelectual, o algo peor. Sólo un escepticismo extremo hacia la ciencia —y una mentalidad abierta hacia otros modelos de conocimiento y formas de vida, por extraños que nos parezcan— puede ayudarnos a superar este peligro.

Feyerabend se ha ganado una amplia audiencia. Su primer libro, *Contra el método*, ha sido traducido a 16 idiomas tras su publicación en 1975, y sigue figurando en la bibliografía de los cursos sobre filosofía de la ciencia.



De Feyerabend se ha dicho que es el Salvador Dalí de la filosofía

Es reacio a las entrevistas. Pero aceptó mi petición. Me hizo llegar una fotografía en la que vestía un delantal, sonreía burlonamente y se inclinaba sobre un fregadero lleno de platos. "Me gustaría", decía su carta, "que empleara la fotografía que le adjunto, donde estoy retratado en mi actividad favorita: lavándole los platos a mi mujer en Roma".

Su cara, en vivo, más parecida aún a la de un geniecillo malvado que en la fotografía de *Nature*, es, al igual que su voz y sus manos, sorprendentemente móvil.

El desprecio por sí mismo sazona su soberbia. Se califica de "haragán" y "bocazas", y cuando le pregunto qué "postura" toma en determinada cuestión, se crispa. "Siempre que tomas una postura, es como si atornillases algo ", dice, haciendo sobre la mesa el gesto de apretar un tornillo. "Tengo opiniones que a veces defiendo vigorosamente, hasta que me doy cuenta de lo estúpidas que son, y las abandono".

Grazia Borrini, la esposa de Feyerabend, física italiana de 40 años cuyo carácter es tan plácido como intenso el de su marido, contempla esta actuación con una sonrisa benévola. Borrini, que conoció a Feyerabend cuando estudiaba salud pública en Berkeley hará unos diez años y que se casó con él seis años más tarde, interviene esporádicamente en la conversación; lo hace, por ejemplo, cuando pregunto a su marido por qué cree que algunos científicos le tienen tanta rabia. "No tengo ni idea", responde él, con una cara que es el vivo retrato de la inocencia. "¿Me tienen rabia?"

"Yo misma, al principio, le tenía rabia", tercia Borrini. Explica que había oído la caricatura que del mensaje de Feyerabend hizo un físico hostil. Pero cuando lo conoció y leyó sus libros se dio cuenta de lo sutiles que eran sus puntos de vista. "Esto es de lo que deberías escribir", me dice ella, "del permanente malentendido". "Bueno, vamos, él no es mi agente de prensa", dice bruscamente Feyerabend, que pasa a defenderse a sí mismo. "Voy hasta el extremo, pero no hasta los extremos por los que me acusan", dice. Por ejemplo, no está en contra

de la ciencia, como algunos han pretendido. "La ciencia ofrece historias fascinantes sobre el universo", comenta. De hecho, abunda, los científicos modernos son de todas todas como esos artistas del pasado, los narradores de leyendas, los trovadores, los bufones de la corte, que tanto entrenían a quienes los escuchaban.

No es sorprendente, claro, que Feyerabend estudiara, además de ciencia, arte dramático y canto en Viena. En realidad, de mayor quería ser a la vez divo de ópera y astrónomo. "Habría pasado las tardes cantando, las noches en el escenario y las madrugadas observando las estrellas", confiesa. Entonces estalló la guerra. Alemania ocupó Austria, y en 1942 Feyerabend se alistó en una academia de oficiales, con la vana esperanza de que su entrenamiento durara más que la guerra. Cuando luchaba contra los rusos en 1945 (mejor sería decir cuando huía de los rusos), recibió un disparo en la columna vertebral. "No me podía levantar, y todavía recuerdo el cuadro que me hice: 'Ah, estaré en una silla de ruedas, rodando de arriba para abajo entre rimeros de libros.' Me sentía muy contento."

Recobró gradualmente la capacidad de andar, ayudado de un bastón. Reemprendió sus estudios en la Universidad de Viena. De la física pasó a la historia, se aburrió, volvió a la física, se aburrió de nuevo, y finalmente acabó en la filosofía. Su ingenio para sacar adelante ideas absurdas le indujo a sospechar que en el desarrollo de un argumento cuenta más la retórica que la verdad. "La verdad misma es un término retórico". Alza la barbilla, y entona cómicamente: "'Voy en busca de la verdad'. ¡Oh, pero qué gran persona!".

En los años que siguieron al de su doctorado (1951) conoció a sus camaradas enemigos de la ciencia. El y Lakatos estudiaron con Popper en la Escuela de Economía de Londres en el decenio de los cincuenta. De Lakatos, que murió en 1974, dice Feyerabend: "Fue mi mejor amigo". Al trasladarse a Berkeley, Feyerabend conoció a Kuhn en 1959. Aunque hizo en parte suyas las ideas de los otros tres, acabó rechazándolas por demasiado conservadoras. Se ganó el odio eterno de Popper por tachar de "marejadilla en el vaso de agua del positivismo" su teoría del "racionalismo crítico". A lo que Kuhn llama "ciencia normal", donde los científicos se entregan a un paradigma dominante, Feyerabend lo denomina "cuento de hadas". Para horror de Kuhn, también sostuvo que el modelo sociopolítico de ciencia de éste se podía aplicar igualmente al crimen organizado.

El escepticismo de Feyerabend se agudizó en los años sesenta, cuando empezaron a acudir a sus clases de Berkeley un número creciente de estudiantes mexicanos, afroamericanos e indios. "¿Quién era yo para decirle a toda esa gente qué y cómo pensar?", es la reflexión que en su libro de 1978 *Ciencia en una sociedad libre* recuerda que por entonces se hacía: "Sus antecesores habían desarrollado culturas propias, lenguajes llenos de colorido, concepciones armoniosas de las relaciones entre individuos y entre el hombre y la naturaleza, culturas cuyos restos son una crítica viva a la separación, el análisis, el ensimismamiento inherentes al pensamiento occidental". Se dio cuenta de que su tarea "era la de un tratante de esclavos muy educado, muy fino".

Los científicos son de todas todas como los viejos narradores de leyendas, trovadores y bufones de la corte.

La solución a esta crisis fue enseñar a sus estudiantes que el conocimiento sólo puede juzgarse en relación a su contexto. Feyerabend pone de relieve que las llamadas sociedades primitivas, como es el caso de los !Kung de Africa, "sobreviven felizmente; no necesitan aparatos. Perviven en un entorno donde cualquier individuo occidental moriría a los pocos días de llegar. Puede objetarse que en esta sociedad la gente vive más, pero la pregunta es: ¿en qué consiste la calidad de vida? Y eso no está tan claro".

Le divierte, y preocupa a la vez, que algunos físicos crean que están cerca de una "teoría de todo". "Dejémoslos que se lo crean, si eso les divierte, pero decirles a los niños pequeños: 'La verdad es ésa', es ir demasiado lejos". Feyerabend defiende que la misma idea de que "esa mosca de un día, un ser humano, ese trocito de nada" descubre los secretos de la existencia es "ridícula". "Lo que han encontrado es una respuesta particular a sus acciones, y la realidad que está tras eso se desternilla: '¡ja, ja, ja, se creen que me han encontrado!'".

La incognoscibilidad de la realidad es uno de los temas del libro que Feyerabend está escribiendo, cuyo título provisional es *la conquista de la abundancia*. "El mundo es realmente abundante", explica, "y no hay cometido que no trate de recortar esa abundancia. Para empezar, el sistema perceptivo la recorta, o no podríamos sobrevivir. Y ahora científicos y filósofos la recortan aún más". Un aspecto del pensamiento humano que está amenazado es la convicción —que toma cuerpo en la religión— de que el universo tiene un porqué trascendental. "Me educaron en la religión católica", dice. "Luego, durante un breve período de tiempo, fui un ateo beligerante, pero ahora mi filosofía tiene un cariz diferente. No puede ser que el universo simplemente haya hecho: ¡pum!, y haya seguido a partir de ahí, desarrollándose. ¿Hay algo más? ¡Tiene que haberlo!"

Puede que el libro nos descubra un Feyerabend más suave. "Me declaro culpable de mi rudeza", confiesa. Le duelen, por ejemplo, algunas de las "cosas feas" que dijo acerca de algunos de sus colegas filósofos. "Hoy no sería como fui porque hoy pienso en la persona sobre la que escribo. A no ser que el tío sea un verdadero mal nacido. Entonces no me importa." Hasta le ha pedido al *Quién es Quién* que quite el epíteto de "criminales" que dedica a los intelectuales.

"Pensé así durante mucho tiempo", dice de la cita, "pero el año pasado la taché, porque hay muchos buenos intelectuales". Se vuelve hacia Borrini. "Ahí tienes, tú eres una intelectual", le dice. "No", responde ella secamente. "Soy física". Pero él rechaza su objeción. "¿Qué significa eso de 'intelectual'? Es la gente que piensa sobre las cosas más que el resto de la gente, quizás".

Le menciono que otro filósofo me ha dicho que su relación con Borrini le ha hecho más "complaciente". Se ríen los dos. "Bueno, cuando te haces viejo no tienes la energía que hace falta para no ser complaciente, pero ciertamente ella ha cambiado mucho las cosas", asegura. "Estuve casado otras tres veces, pero ésta es la primera vez que me siento feliz de estarlo".

La sonrisa de Borrini es radiante. Pero cuando le pregunto si a Feyerabend realmente le gusta lavarle los platos, como pretende, bufa. "De uvas a peras", descubre. "¿Cómo que de uvas a peras?", grita él. "¡Si lavo los platos cada día!". "De uvas a peras", repite Borrini con firmeza. Una vez más, los excesos retóricos han puesto a Feyerabend en un apuro.

Ciencia y sociedad

Sistemática vegetal

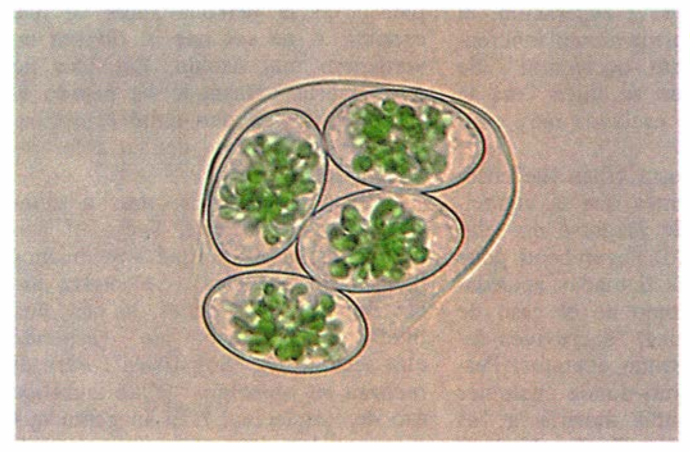
¿Una nueva división?

La descripción de nuevas especies es el pan de cada día en biología sistemática. Pero, cuando se trata de crear grupos de alcance amplio ante la aportación de nuevos datos y pruebas, la conmoción producida es notable: se multiplican las especies y se dilatan los criterios de jerarquización sistemática. Así puede ocurrir con el reciente hallazgo de una nueva rama del árbol de la vida, de nivel parejo al que ocupan los vertebrados o las plantas con semillas. Nos referimos a la bifurcación descubierta en las algas, ricas en tipos y variantes.

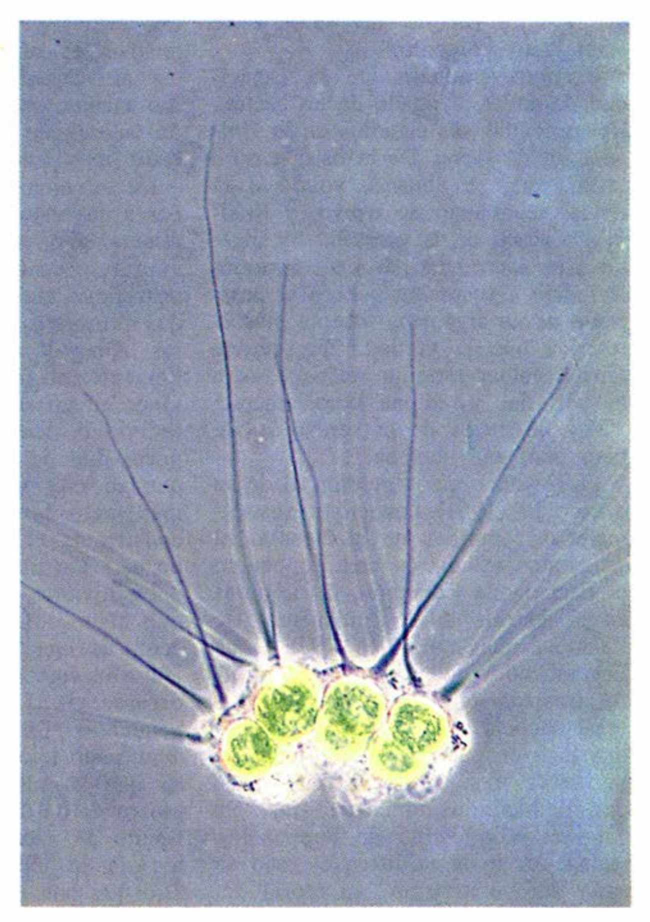
En 1868, el médico Hermann Itzigsohn describió un alga unicelular particular, *Glaucocystis nostochinearum*, dotada de pared celular y con inclusiones azulverdosas. Con tales datos no era fácil encajarla en ningún taxón. Veinte años más tarde, Gustav Lagerheim, botánico sueco, planteaba otra aporía con un alga parecida, *Gloeochaete wittrockiana*. Entre 1929 y 1930, Lothar Geitler, en Viena, y Adolf Pascher, en Praga, removieron provechosamente el terreno y demostraron que los componentes "azulverdosos" de *Glaucocystis* y de *Gloeochaete* procedían verosímilmente de algas azules, las actuales Cianobacterias. Se trataba, pues, de simbiontes colonizadores de células, a los que Geitler dio el nombre de cianelas.

No parecía plantear mayor problema la separación de algas azulverdosas endosimbiontes o citosimbiontes de otras algas respecto de sus huéspedes para su aislamiento y cultivo, tarea en la que, sin embargo, fracasaron los métodos habituales. La razón de lo cual la hallaría el grupo de Wolfgang Löffelhardt, de la Universidad de Viena. En 1980 demostraron que las cianelas ceden buena parte de su material genético al núcleo de la célula huésped. Sólo les queda entre y el 5 y el 10 por ciento del genoma que posee una cianobacteria independiente. Viene ello a corresponder con la autonomía genética de los cloroplastos (orgánulos fotosintetizadores) de los vegetales superiores.

Desde el punto de vista de la genética molecular podrían considerarse, pues, como cloroplastos si atendemos a sus pigmentos, de no ser por otras propiedades. Las cianelas, lo mismo que las cianobacterias y las demás eubacterias, poseen una pared







Las cianelas son ciertas inclusiones azulverdosas que caracterizan a una nueva división del reino vegetal. En las cuatro autoesporas, células hijas sin capacidad de movimiento formadas por división asexual, de Glaucocystis nostochinearum, *rodeadas todavía por la pared de la célula progenitora, las cianelas adquieren una forma estrellada (*arriba, a la izquierda*). Las inclusiones de* Gloeochaete wittrockiana *son pequeñas y esféricas. Vemos a la derecha una colonia de seis células con largos pseudocilios.* Cyanoptiche gloecystis (abajo, a la izquierda) *ha sido redescubierta por Kies en el mismo estanque vienés donde se vio por única vez en 1925*

celular de peptidoglicanos y, envueltas en una membrana, yacen en vacuolas de la célula huésped. Conjugan rasgos propios de orgánulos (dependencia genética del núcleo del huésped) con atributos típicos de las cianobacterias (pared de peptidoglicanos). Se las puede suponer cianobacterias instaladas en el interior de una célula extraña (inclusión vacuolar).

Tal combinación insólita de propiedades desató la controversia sobre la clasificación de los organismos que las presentaban. No faltaron propuestas para acomodar a los organismos portadores de cianelas entre las algas rojas o la verdes, pero no acababan de convencer.

Uno de nosotros (Kies) ha descubierto, con ayuda del microscopio electrónico, ciertas peculiaridades estructurales de las algas con cianelas que se salen de lo habitual, en particular por darse juntas en un mismo organismo; así: una zona de corpúsculos de membrana aplastados por debajo mismo de la membrana plasmática, la presencia de raíces flagelares pluriestratificadas y división celular por segmentación. Estas algas utilizan, como sustancia de reserva, gránulos de polisacáridos (almidón) dispersos por el citoplasma. Se ha hablado también de peculiaridades en el intercambio de hidratos de carbono y varias diferencias bioquímicas más respecto de otros grupos de algas.

Si con ese manojo de notas propias no encontraban fácil inserción ni conformaban a su vez un taxón algal, pensamos que había que crear un nuevo círculo de parentesco definido por las propiedades siguientes: algas unicelulares dotadas de las características mencionadas, que desempeñan funciones propias de cloroplastos y que garantizan la aportación nutritiva a la célula que las hospeda. Integran la división de las Glaucocystophyta con una sola clase de momento, la de las Glaucocystophyceae.

Por lo que a tipología concierne, este grupo de parentesco se presenta en situación de igualdad con otros grandes del reino vegetal y se corresponde, en rango taxonómico, con el de las algas verdes, líquenes o plantas vasculares. Las Glaucocystophyta representan un experimento independiente de desarrollar células con elementos fotosintéticos. Aunque, hemos de confesarlo, no alcanzaran un éxito rotundo, ya que ni siquiera suman la docena de especies.

Las formas portadoras de cianelas son una suerte de restos fósiles cuyo origen filogenético resulta imposible determinar. Las dos opciones alternativas son viables desde la genética molecular: o bien se remontan a un pasado lejanísimo en la evolución, o bien se trata de un experimento distinto de la génesis de cloroplastos y serían entonces recientes.

Pudiera ocurrir también que esta nueva división, de escueta diversidad de tipos, se incrementara con otras especies de las que sólo existen estudios anticuados y no se han abordado con las modernas técnicas discriminatorias. Pensemos, a este propósito, en la unicelular *Cyanoptyche gleocystis* var. *dispersa*, que no ha vuelto a encontrarse desde su descripción en 1925... hasta que la volvió a hallar uno de nostros (Kies) en el mismo lugar, un estanque vienés. Investigada en el laboratorio, se comprobó que la estructura mostraba una absoluta coincidencia con la nueva división de las Glaucocystophyta. (Ludwig Kies, de la Universidad de Hamburgo, y Bruno P. Kremer, de la Universidad de Colonia.)

Dilemas universales

¿Un cosmos eterno?

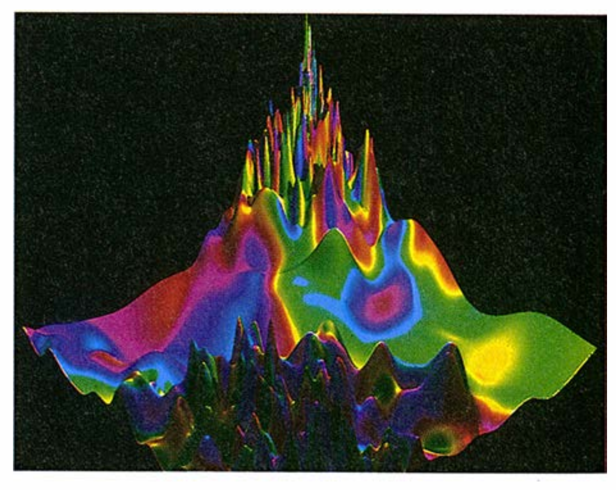
Hasta ahora, a los interesados por el destino del universo les cabía contrapesar sólo dos posibilidades más bien desoladoras: o bien el cosmos continuará expandiéndose indefinidamente y su materia se disipará en un vacío frío y oscuro, o bien se contraerá sobre sí mismo y acabará en un cataclismo de gran implosión ("big crunch"). Para los que estén dispuestos a ampliar sus horizontes, Andrei D. Linde propone un estado de cosas menos desalentador: la autorreproducción eterna del universo.

La teoría de Linde se funda en el concepto de "inflación", según el cual el universo, nada más producirse la gran explosión ("big bang"), cuando aún era extraordinariamente pequeño, caliente y denso, experimentó un prodigioso estirón antes de aquietarse en su baja velocidad de expansión actual. El cosmos en su conjunto podría haber surgido de un jirón minúsculo de espacio. "Lo más probable es que este universo que estudiamos haya sido creado por universos anteriores", añade.

Las primeras versiones de la teoría de la inflación, que se basan en la física de partículas y están empapadas de ella, requerían condiciones muy específicas, muy exactamente "sintonizadas". Pero Linde ha mostrado que la inflación puede nacer de procesos más genéricos. Según la mecánica cuántica, el espacio nunca está enteramente vacío; a escala muy pequeña, su contenido de energía fluctúa violentamente. Estas fluctuaciones cuánticas caóticas, dice Linde, podrían engendrar energía de suficiente densidad para detonar la inflación.

La inflación se autolimita: atenúa rápidamente la energía consumiéndola. Pero Linde sostiene además que la inflación se autoperpetúa: las fluctuaciones cuánticas aseguran que, en algún lugar, de alguna mota de energía seguirán brotando nuevos universos, radicalmente diferentes, en general, del nuestro. Minúsculas alteraciones en sus condiciones iniciales podrían dar como resultado cambios drásticos en la manera que tengan sus leyes físicas de manifestarse una vez la inflación haya cesado.

Con su hijo Dmitri y otros colaboradores, Linde ha realizado una simulación por ordenador. Las imágenes muestran un paisaje quebrado, que representa un corte bidimensional del espacio. Los picos indican regiones de altas energías, inflacionarias; los valles, regiones de energía relativamente baja, como nuestro propio universo local, donde ha cesado la inflación. Los colores definen áreas cuyas condiciones iniciales, y leyes físicas, son diferentes. Linde señala que el patrón montañoso creado por las diferencias de energía es de naturaleza fractal: se repite a escalas billones de veces más pequeñas que el protón o billones de veces mayores que el universo conocido.



Fluctuaciones fractales de la energía producen infinitos universos en una simulación por ordenador realizada por Andrei D. Linde

¿Dónde está la prueba? Linde observa que la hace poco obtenida detección de "rizados" en la radiación de fondo, la huella, se piensa, dejada por el nacimiento violento del universo, casa bien con las predicciones de la teoría de la inflación. Parece que las estimaciones de la masa total del universo convergen también hacia el valor predicho por la teoría de la inflación, que es suficiente para refrenar la expansión del universo —es decir, del universo local—, pero no para detenerla del todo. En cuanto a todos esos universos nacientes en la más remota lejanía, están a tales distancias de nosotros, que ningún método de observación hoy concebible podrá salvarlas.

Cromosomas

La expresión del ARN

El misterio de los gatos calicó va más allá de la coloración de su pelaje. Los retazos amarillos y negros de su librea son la manifestación externa de una peculiaridad genética más sutil. Los auténticos calicó son hembras, que, lo mismo que las hembras de los demás mamíferos, portan en sus células dos cromosomas X. Pero sucede que, en una fase precoz de su desarrollo, cada célula del embrión elige al azar uno de los cromosomas X para utilizarlo en el futuro, y el otro queda condensado permanentemente, formando una masa inerte: el corpúsculo de Barr. (Las hembras se equiparan así a los machos, que portan sólo un cromosoma X y otro Y, inactivo en su mayor parte.) En los gatos calicó, el mosaicismo que resulta se manifiesta en el exterior porque cada cromosoma X contiene un gen de pigmentación distinto.

Comienza a hacerse la luz en el mecanismo que utilizan las células de mamíferos para inactivar un cromosoma entero. La clave parece residir en un gen presente en el cromosoma X inactivo, que produce una molécula de ARN de función desconocida. Hay varias hipótesis para explicar la proeza de ese gen. "Mi impresión personal", apunta Carolyn J. Brown, una de las descubridoras del gen, es que la molécula de ARN resulta imprescindible para formar algún tipo de maraña o estructura, que separa al cromosoma X, y permite la inactivación".

Brown, del laboratorio de Huntington F. Willard, en la Universidad Case Western Reserve, se dedicaba a la expresión génica en el corpúsculo de Barr. Hay unos cuantos genes que escapan a la señal general de "desconexión" y permanecen activos en los dos cromosomas X. En 1990, el grupo de Willard encontró, sin embargo, un gen que mostraba un comportamiento especial: sólo era activo en el corpúsculo de Barr. Además, el gen se localizaba en una región del cromosoma X que era esencial para la inactivación de dicho cromosoma.

Todos esos datos apuntaban a que el gen, que el grupo de Willard designó *Xist* (por X *i*nactive-*s*pecific *t*ranscript), desempeñaba un papel importante en la inactivación del cromosoma X. El grupo avanzó su propuesta en enero de 1991. Meses después, Sohaila Rastan y Neil Brockdorff publicaron el descubrimiento del gen *Xist* de ratón.

El pasado octubre, en la revista *Cell*, los grupos de Willard y Rastan dieron a conocer sus análisis de los genes *Xist* humano y de ratón. Esos genes producen moléculas de ARN excepcionalmente grandes y bastante similares. Sin embargo, a diferencia de la mayoría de los ARN, que abandonan el núcleo celular y se traducen en proteínas, el ARN de Xist no porta información para ninguna proteína. Además, nunca deja el núcleo. Se queda junto al cromosoma X que lo sintetiza.

Estos resultados sugieren varios modelos para explicar la inactivación. Uno: a medida que se va sintetizando el ARN de Xist, se va pegando al cromosoma, quizá junto con otras moléculas; la maraña de ARN que resulta puede provocar directamente la incapacitación de la mayoría de los genes. Otra hipótesis: la presencia del ARN podría hacer que el cromosoma interaccionase con otros factores presentes en la membrana nuclear, o en alguna otra parte, que lo inactiven. Tercera opción: el propio ARN no realiza función alguna, sino que la transcripción de esa región induce cambios conformacionales en el cromosoma que determinan su inactivación.

En los últimos tiempos ha cobrado fuerza la hipótesis de la asociación entre *Xist* y la inactivación del cromosoma X, gracias a los trabajos de Larry J. Shapiro, Jacob Wahrman, John R. McCarrey y Donald D. Dilworth. Han encontrado, que la transcripción de *Xist* refleja con precisión la inactivación de los cromosomas X en varios tejidos.

En enero, Graham F. Kay publicó que en células embrionarias tempranas se puede observar transcripción del gen *Xist* un día antes, aproximadamente, de la inactivación del cromosoma X. "Eso nos dice que la expresión de *Xist* no es simplemente una consecuencia de la inactivación del X, y apoya la idea de una relación causal", comenta Brockdorff. Brown coincide con la idea de que *Xist* es una suerte de "cuerpo del delito", pero advierte que aún debe demostrarse su importancia durante la inactivación.

Habrá que hacer más experimentos para fijar estas hipótesis. "Queremos ahora desbaratar los genes *Xist* de una célula madre embrionaria", explica Brockdorff. "Si *Xist* es necesario, esas células no podrán inactivar el cromosoma X". Los investigadores pueden tambien insertar copias activas de *Xist* en células, para ver si los genes vecinos se inactivan.

Quedan por responder muchas otras preguntas. "Si *Xist* está implicado en la inactivación del cromosoma X, debe haber algo que lo active o lo inactive", apunta Brown. Importa averiguar el mecanismo de interacción entre el ARN de Xist y el cromosoma. Por ahora, sólo se puede especular sobre cómo se transmite de una célula a sus descendientes la información relativa al cromosoma X que debe inactivarse.

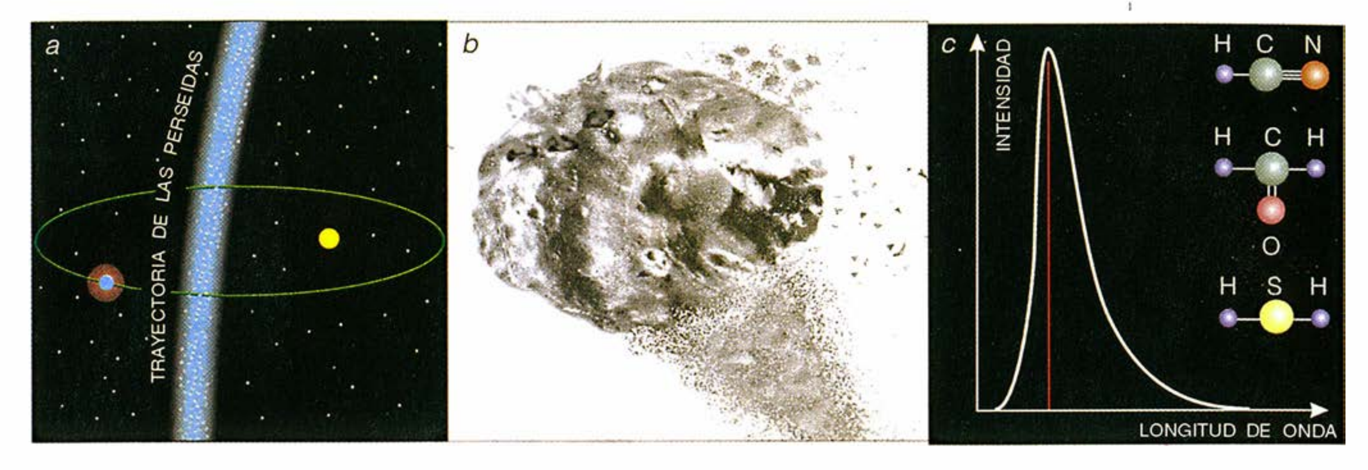
Swift-Tuttle

Un asunto policial

La historia del cometa Swift-Tuttle se asemeja a una indagación policial. En 1862, se vio un gran cometa de magnitud 2 que tenía, al pasar por el punto más cercano a la Tierra —a 52 millones de kilómetros de ésta— una magnífica cola de 30 grados de longitud. A partir de estas observaciones se determinaron los elementos de su órbita y, en particular, su período, evaluado en 120 años.

Poco después de 1862, el astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli descubrió que la trayectoria del cometa se solapaba con la de las Perseidas. Se da este nombre a un conjunto de meteoritos que causa la lluvia de estrellas fugaces que se ve todos los años por agosto, cuando la Tierra pasa por la región de la eclíptica que cruza la trayectoria del enjambre. Con ello se entendió mejor el origen de esos enjambres de meteoritos: son polvo expulsado por los cometas, que al entrar en la atmósfera terrestre da lugar a las estrellas fugaces.

En los años setenta de nuestro siglo renació el interés por el cometa Swift-Tuttle, y se hicieron los preparativos necesarios para su observación. Los cálculos predecían que regresaría a finales de 1982. Pero la



Las estrellas fugaces aparecen durante el mes de agosto, cuando la atmósfera terrestre se cruza con la trayectoria de las Perseidas (a). *Esquema del cometa y de sus eyecciones* (b). *Las líneas emitidas por las moléculas del gas del cometa —HCN, H_2CO, H_2S— son asimétricas debido a que el gas está en movimiento con respecto a nosotros. El segmento rojo corresponde a nuestra velocidad* (c)

decepción fue grande. Hubo que rendirse a la evidencia: el cometa no volvía. ¿Se había desintegrado totalmente? ¿O se había vuelto tan débil que no se le podía observar ya? Un brillo tan variable explicaría de paso que no haya indicios de visitas del cometa anteriores a 1862.

No obstante, en 1973 Brian Marsden había señalado que el cometa de 1862 quizá fuese el mismo que observó en China el misionero jesuita Ignace Kegler —corría el año 1737—, y también el visto en 1610 y en 1479. Su período abarcaría, por tanto, más de 120 años, y no sería constante a causa de efectos no gravitacionales. Marsden llegaba a la conclusión de que, si el cometa no volvía en 1983, habría que identificarlo con el cometa de Kegler, y esperar, por tanto, su paso en 1992.

Hay cometas que, aun teniendo en cuenta las perturbaciones que producen los nueve planetas del sistema solar, llegan al perihelio (su distancia más cercana al Sol) bien con retraso, bien antes de la fecha que el cálculo prevé. Este desajuste se atribuye a la pérdida anisótropa del gas del cometa, cada vez más caliente por el lado expuesto al Sol, pues esa pérdida hace que retroceda en la dirección opuesta. Estas fuerzas no gravitacionales se determinan indirectamente de manera que den cuenta de la diferencia existente entre la trayectoria de un cometa prevista por la teoría de la mecánica celeste y la efectivamente observada. A la vez, se miden estas fuerzas directamente mediante el estudio de la cinemática del gas que envuelve el cometa: cuando hay una pérdida anisótropa de gas se espera que aparezcan en las rayas espectrales de éste desplazamientos debidos al efecto Doppler-Fizeau, que variarán con el ángulo entre la velocidad del gas y la dirección del observador. En la región de ondas de radio este desplazamiento se detecta mejor que en la zona del visible, gracias a la buena resolución espectral de los espectrógrafos que operan en esas longitudes de onda.

Y, efectivamente, el cometa Swift-Tuttle ha vuelto: anunciado por una mayor intensidad de la lluvia de estrellas fugaces en agosto —pues el cometa reabastace las Perseidas—, el encuentro se produjo el 26 de septiembre. Alcanzó su perihelio el 12 de diciembre. Es menos espectacular que en 1862, ya que pasa a una distancia tres veces mayor que aquel año; a pesar de todo, con su magnitud 5, sigue brillando bastante.

Un equipo francés, formado por Dominique Bockeleé-Morvan, François Colas, Pierre Colom, Jacques Crovisier, Didier Despois, Laurent Jorda, Jean Lecacheux y Gabriel Paubert, ha organizado en muy poco tiempo un conjunto de observaciones coordinadas en el que se han utilizando varios telescopios y radiotelescopios. El tiempo



Fotografía de un chorro de polvo emitido por el cometa. La altura de la imagen equivale a 70.000 kilómetros. Los colores corresponden a las diferentes densidades gaseosas

de observación se ha negociado fuera de los medios habituales, demasiado premiosos. El equipo ha descubierto, sin ambigüedad alguna, desplazamientos en muchas de las líneas espectrales del gas del cometa, y ha obtenido imágenes de la causa del fenómeno: chorros de gas y polvo que se extienden a lo largo de varios miles de kilómetros.

El radical OH, producto de la descomposición de la molécula de agua, fue el primero en ser detectado, el 15 de octubre, en Nançay; la fuerte intensidad de la línea, cuya longitud de onda es de 18 centímetros, indicaba una elevada tasa de producción de este radical y, por tanto, una fuerte actividad del cometa. Las líneas de emisión del metanol (CH_3OH), cuyas longitudes de onda son 1,8 y 2,1 milímetros, detectadas un mes más tarde con el radiotelescopio de 30 metros de diámetro del IRAM en el pico Veleta, mostraban una abundancia de dicho elemento diferente de la medida en el infrarrojo, a unas longitudes de onda de 3,4 y 3,52 micrometros, por un equipo anglo-americano.

Los radioastrónomos dirigían sus telescopios a ciegas hacia la posición que se le presumía al cometa; en el infrarrojo, en cambio, era posible detectar la imagen, y percibir que la posición calculada era errónea en 12": no tanto como para que se le escapase a la radioantena, pero sí lo bastante para que se subestimase considerablemente la tasa de producción de metanol. Se supuso, y verificó, que esos 12" de error se debían a que en el cálculo se pasaron por alto las fuerzas no gravitacionales. A principios de enero de 1993, se apuntaron las antenas teniendo en cuenta esos 12", y se observó una tasa de producción de metanol que casaba con la obtenida en las observaciones infrarrojas.

Las observaciones de radio han permitido, además, el estudio de las moléculas de ácido cianhídrico (HCN), de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y de formaldehído (H_2CO), estudios que se complementan y permiten comprender mejor los mecanismos de emisión de las moléculas.

Todas esas líneas son asimétricas, con un pico muy pronunciado en las longitudes de onda cortas, de lo que se desprende que la velocidad de eyección está dirigida hacia el Sol, y que tiene una magnitud —de 600 a 1000 metros por segundo— no vista hasta ahora: la emisión del gas se produce esencialmente por medio de los chorros, que, mediante el efecto de reacción, generan las fuerzas no gravitacionales que sufre el núcleo del cometa y perturban su órbita.

El equipo francés había ya encontrado, a partir del espectro del cometa Halley, una velocidad de eyección gaseosa de 150 metros por segundo. Desaparece ahora toda ambigüedad: el cometa experimenta un retroceso considerable debido a la importancia de los chorros de gas. Los chorros de polvo, a los de gas asociados, se dejan ver claramente en las imágenes obtenidas en el Pic du Midi. Tanto el gas como el polvo indican que hay varios chorros, cuyas posiciones cambian día a día.

Sólo teniendo en cuenta estas fuerzas no gravitacionales cabe localizar las posiciones del cometa observadas en 1737, en 1862 y en 1992. El análisis de los perfiles de las líneas correspondientes a las longitudes de onda de radio permitirá cuantificar las fuerzas, y comparando éstas con las perturbaciones de la órbita, se podrá determinar tal vez la masa del cometa. El aficionado a la astronomía disfrutará en agosto de este año de unas Perseidas que, enriquecidas por los residuos del Swift-Tuttle, serán tan magníficas como las de agosto de 1992. (Lucienne Gouguenheim, del Observatorio de París.)

Ronroneo de los gatos

Cómo y por qué

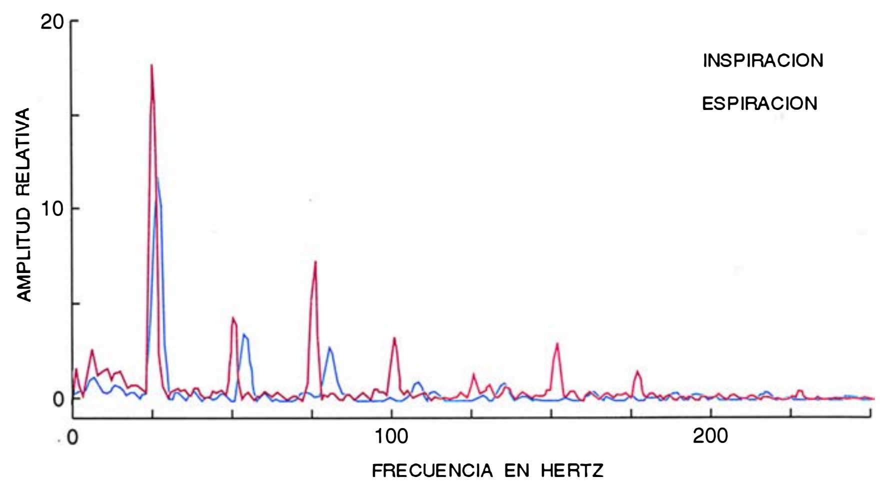
El plácido ronroneo del gato produce, en muchas personas, una sensación agradable. Es como el de una erre sostenida en todos los felinos domésticos, si bien timbre y volumen suelen variar de un animal a otro. El ronroneo, que dura incluso varios minutos, ocurre lo mismo en el movimiento de inspiración que en el de espiración. Pero en la inversión del flujo de la corriente de aire se interrumpe, de manera casi imperceptible, el sonido. El oído humano puede distinguir el ronroneo de inspiración del producido durante la espiración.

El sonido se acompaña de las vibraciones de la superficie cutánea del cuello, la laringe y la caja torácica, vibraciones que podemos percibir aunque el ronroneo sea muy tenue. Se han venido defendiendo distintas hipótesis sobre los órganos y procesos fisiológicos implicados en la formación del sonido. En un principio se atribuyó a las cuerdas vocales, el diafragma y el paladar blando.

Para dilucidar la cuestión, acometimos ensayos de frecuencias. Tomamos diez gatos domésticos de diversa edad. Anotamos la intensidad de su ronroneo y la vibración de la superficie de la piel en distintas regiones del cuerpo y a distancias variables, en uno y dos canales. Optamos por varios métodos de medición. Registramos grabaciones de un solo canal de otros gatos domésticos y salvajes.

Se observó que el tono básico del ronroneo es, en promedio, de unos 26 hertz y que el ronroneo de espiración es de unos 2,4 hertz más alto que el de inspiración. (Por mor de comparación, el hombre genera sus tonos más graves en el rango de los 43 hertz.) También la laringe vibra con esa frecuencia umbral, sin interrupción durante el cambio de sentido de las fases respiratorias.

Importa destacar que no se pudo deducir ninguna correlación entre la frecuencia del tono base y el tamaño o el peso del animal. En el ejemplar que controlamos desde su tercer mes



Frecuencias del ronroneo de un gato doméstico durante la inspiración y la espiración. La mayor amplitud corresponde al tono básico, en tanto que la potencia de los agudos disminuye con la frecuencia. En la inspiración, el tono básico es más grave, y los agudos más ricos en volumen y variedad, que en la espiración

de vida hasta los tres años cumplidos no se hallaron diferencias ni variaciones significativas en las oscilaciones de su tono base. En ese punto, pues, también el ronroneo de los gatos diverge de los sonidos emitidos por otros mamíferos.

Además, mientras ronronean, estos felinos pueden producir otro tipo de ruidos, sobre todo durante la fase de espiración. En tales casos se emite un sonido compuesto, en el que tienen distinto peso relativo cada uno de los integrantes. Aunque sea imperceptible la fracción correspondiente al ronroneo, se pueden medir modulaciones de amplitud de unos 26 hertz.

Estos hallazgos respaldan la idea de que el ronroneo, a diferencia de otras formas de sonido producidas por mamíferos, no tiene como único origen el movimiento de las cuerdas vocales generado en la alternancia de tensión y relajación y la oposición al flujo de aire. Probablemente dependan él y las vibraciones que lo acompañan de una modulación de la corriente respiratoria por la musculatura laríngica, con carácter periódico y coordinada por el sistema nervioso central. Resulta también verosímil que la formación del sonido se siga de la brusca apertura de las cuerdas vocales.

Además del tono básico, el ronroneo presenta tonos agudos y débiles que modulan el sonido emitido. Su intensidad disminuye a medida que crece la frecuencia. El ronroneo de inspiración no sólo tiene el tono base más grave, sino que es más rico e intenso en tonos agudos que el de espiración, lo que determina que lo percibamos distinto.

La investigación del ronroneo plantea inmediatamente la cuestión sobre su significado. La creencia popular lo asocia a un estado de tranquilidad y bienestar. Sin duda esta interpretación engloba múltiples situaciones en las que se produce ronroneo, pero no puede explicarlas todas. Los cachorros adquieren ese hábito muy pronto, y no es raro ver ronronear, al unísono, madre y camada durante el amamantamiento; dándose contacto físico, cabe inferir que la vibración corporal constituirá también una señal.

Puede admitirse que, en tales casos, el ronroneo sea expresión de bienestar, aunque en el sentido de que todo marcha bien: los cachorros se sienten hartos, protegidos de cualquier agresión exterior y calientes. Lo que también explicaría la intensidad mínima del sonido emitido (imperceptible a más de tres metros de distancia), evitando de ese modo ser descubiertos por los depredadores.

Mas existen otras situaciones bien estudiadas, como el caso de un gato herido o de la hembra durante el parto y los agudos dolores que les acompañan. Ambos ronronean, pero difícilmente podemos interpretarlo como señal de bienestar. Cabe suponer que tenga como finalidad la de calmar al propio animal o de apaciguamiento ante la amenaza potencial del hombre que puede acercársele.

No se ha podido determinar si todos los felinos ronronean. Ni leones, ni tigres, jaguares o leopardos, por lo que parece, están capacitados. Aunque a veces se sostiene lo contrario. La cuestión se dirimirá cuando se aporten las grabaciones que descubran que el sonido registrado ofrece las mismas características observadas en el ronroneo del gato. El ronroneo quizá no se circunscriba a la familia de los felinos. En jinetas, ciertos monos y algunos roedores se ha percibido un ruido similar, pero habrá que establecer si es el mismo que caracteriza a los gatos domésticos. (Gustav Peters, David Rice y Dawn Frazer Sissom.)

Teoría nuclear

Distancias cortas

Durante años y años los físicos han ido conociendo mejor la manera en que las fuerzas fundamentales de la naturaleza actúan sobre las partículas elementales más recónditas. De pronto, han caído en la cuenta de que no saben qué mantiene unido el núcleo de un átomo. "Por mucho tiempo hemos defendido una idea muy sencilla, que ahora nos parece más bien simple", comenta George F. Bertsch, de la Universidad de Washington.

Se suponía que los protones y neutrones que constituyen el núcleo de un átomo se atraen entre sí intercambiando una partícula, el mesón pi, o pion. Los aceleradores han mostrado que al pion sólo se debe la transmisión de la fuerza nuclear a grandes distancias. Pero, ¿qué pasa a distancias cortas?

Desde luego, cuando en este contexto hablamos de distancias grandes hablamos de hiatos que, desde el punto de vista corriente, son menos que nada. Pero el diámetro de un protón es sólo de un fermi (una milésima de billonésima de metro), y por eso los físicos nucleares consideran que una distancia de unos cuantos fermis es grande.

La idea de que una partícula transporta la fuerza nuclear se remonta a los años treinta, y se debe al premio Nobel Hideki Yukawa. Su teoría fue confirmada en 1947, cuando el grupo de Cecil Frank Powell descubrió el pion. Yukawa había predicho que esa partícula era la intermediaria de todas las interacciones nucleares.

Pero las cosas se complicaron en los años setenta. Se demostró por entonces que los protones, neutrones y piones estaban a su vez compuestos por partículas elementales llamadas quarks, de tipo "arriba" ("up") y de tipo "abajo" ("down"), y gluones. Un protón está formado por dos quarks "arriba" y un quark "abajo"; un neutrón es un quark "arriba" y dos "abajo". Un pion puede estar formado por un quark "arriba" y la contrapartida de antimateria de un quark "abajo", pero también por otros pares de quarks. En los piones, neutrones y protones los quarks se mantienen unidos gracias a los gluones, que transportan la interacción fuerte de la misma manera que los fotones hacen lo propio con la fuerza electromagnética.

En última instancia, gluones y quarks deben ser los transmisores de la fuerza nuclear, pero de lo que se trata es de saber cuál es la combinación de gluones y quarks que realiza esa función. A comienzos de los años ochenta se había deducido ya que había varios pares de quarks capaces de transportar fuerzas nucleares, pero se seguía creyendo que los piones desempeñaban el papel más importante.

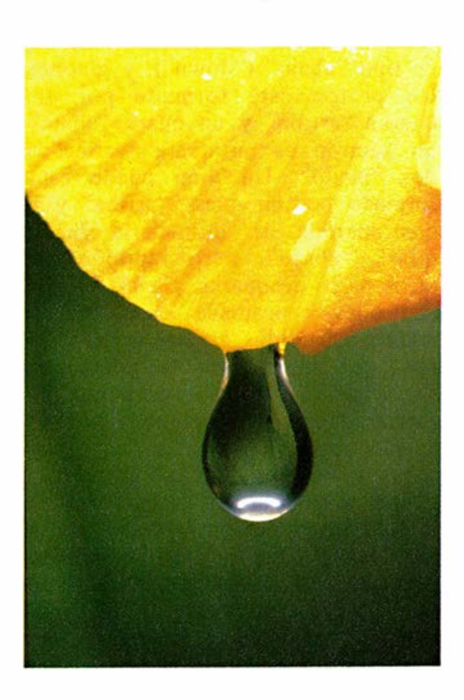
En 1986 se intentó observar el intercambio de piones bombardeando núcleos atómicos con protones. Por lo que se vio, no parecía que los piones interviniesen en las interacciones nucleares de corto alcance. Tras una serie de experimentos que concluyó el verano pasado, no quedaba ya otra salida que aceptar que los piones transportan la fuerza nuclear sólo a distancias de 0,5 fermi o más. "Aunque una fracción de un fermi no parezca demasiado, esa escala de distancias es crucial en todos los procesos nucleares".

Por desgracia, los nuevos descubrimientos no dan muchos indicios de cómo interaccionan protones y neutrones a distancias cortas. Es bastante probable que en distancias cortas la fuerza nuclear sea transportada por una partícula más pesada que el pion. Más desconcertante es la posibilidad de que los propios gluones tengan directamente que ver con su transmisión a esas distancias. Sólo se sabe que hay gluones dentro de los protones y los neutrones; si los gluones saltasen entre los protones y los neutrones de los núcleos atómicos, habría que reescribir la teoría nuclear.

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Agua viva



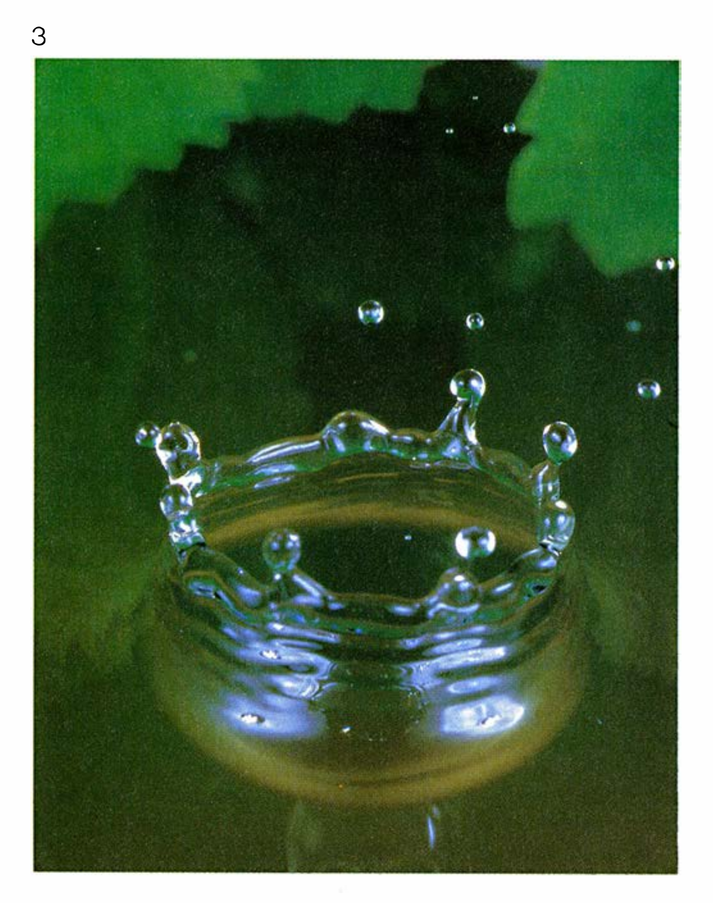
Cuando la ciencia despertó en Occidente, siete siglos antes de Cristo, del sueño de los mitos, retuvo de ese estado onírico la idea del agua como fuente primigenia de vida. La verdad es que no hace todavía mucho creíase que los fluidos internos del hombre denunciaban un remoto origen marino, dado que parecían amasados con la misma agua.

Pero tiene ésta su propio embrujo, sin necesidad de remitir a connotaciones antropocéntricas. Mimosamente se van las gotas formando del sudor de las hojas blandas que amansan las plantas del estanque. Nacen, quizás, en el limbo del pétalo y, grávidas, caen para desaparecer en cumplimiento del eterno retorno que son los ciclos de la vida. En su breve permanencia autónoma, la gota adquiere distintas formas, las que quise captar en toda su belleza.

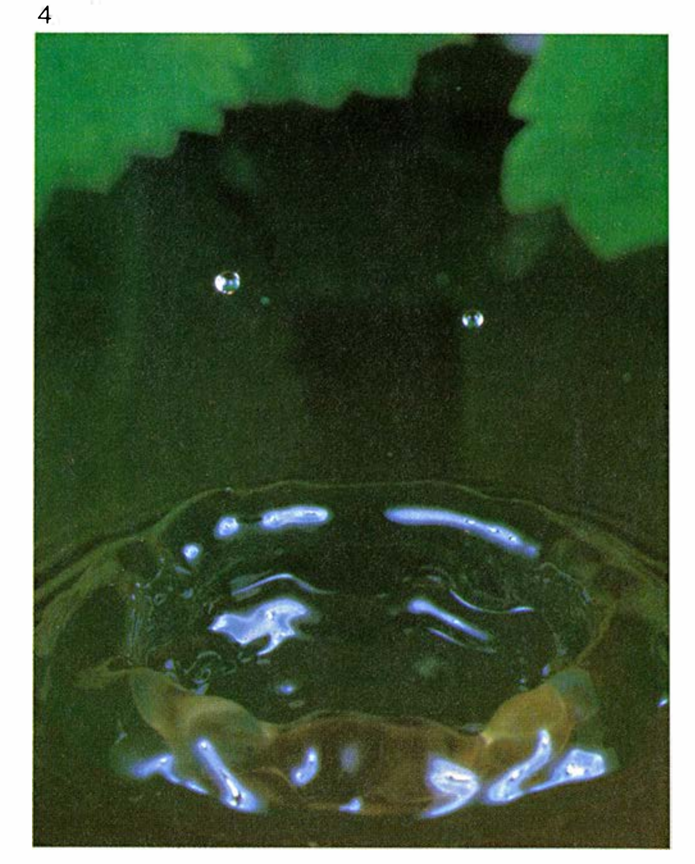
No es fácil sorprenderla en la figura de corona de leche. De lo que me costó no tiene idea el lector. Adosé al sensor fotoeléctrico el equipo ralentizador de disparos. El intervalo entre una y otra toma no es uniforme. Saqué varias docenas. Y escogí las que mostraban mayor, por sorprendente, disparidad.

distancia focal: 80 mm macro
diafragma: F = 22
exposición: 1/22.000 de segundo
película: ISO = 100

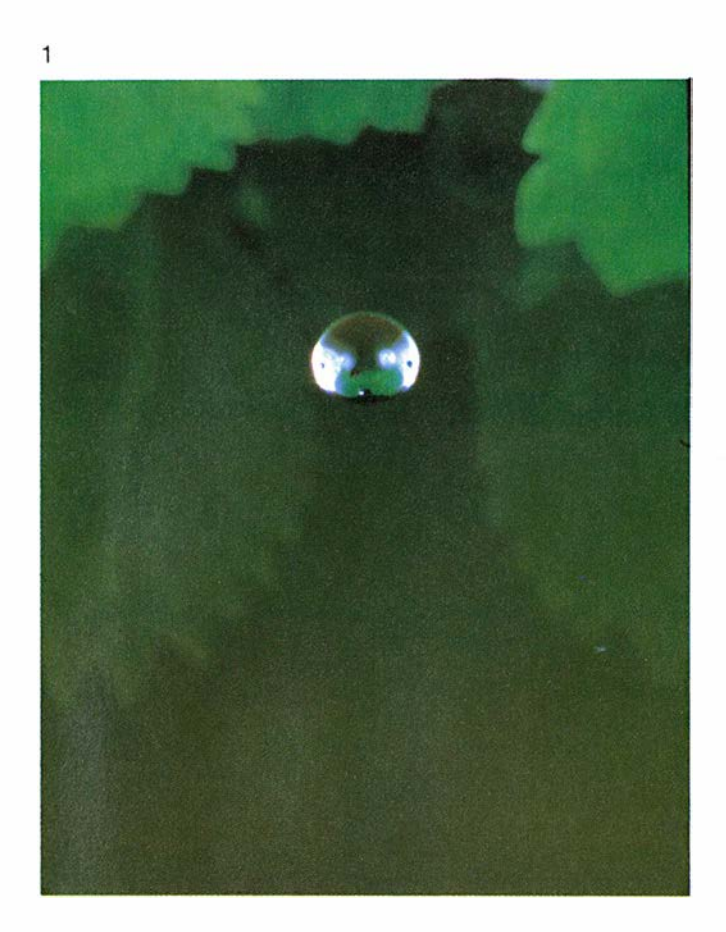
3



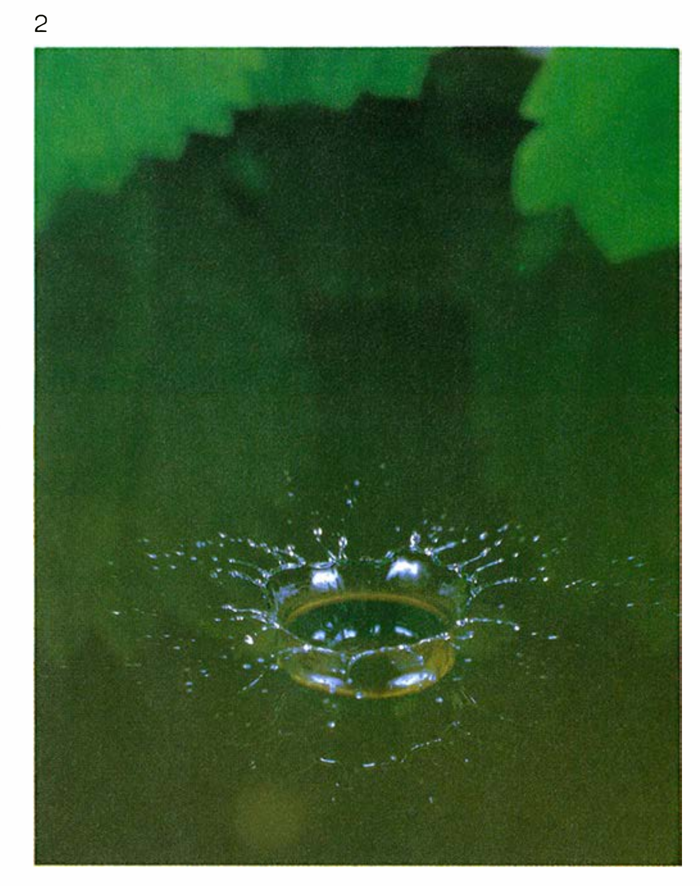
4



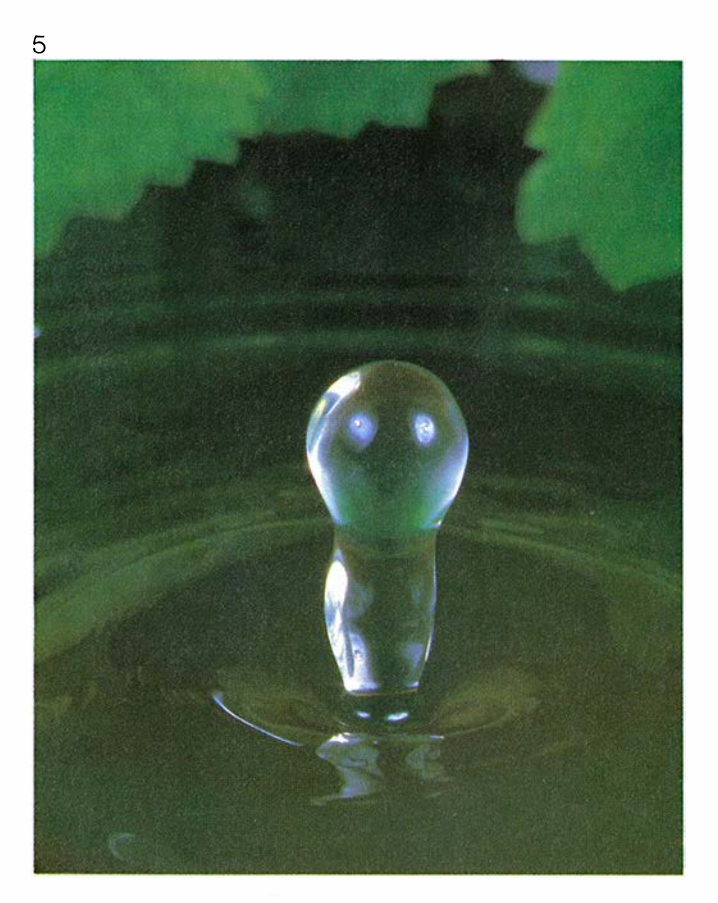
1



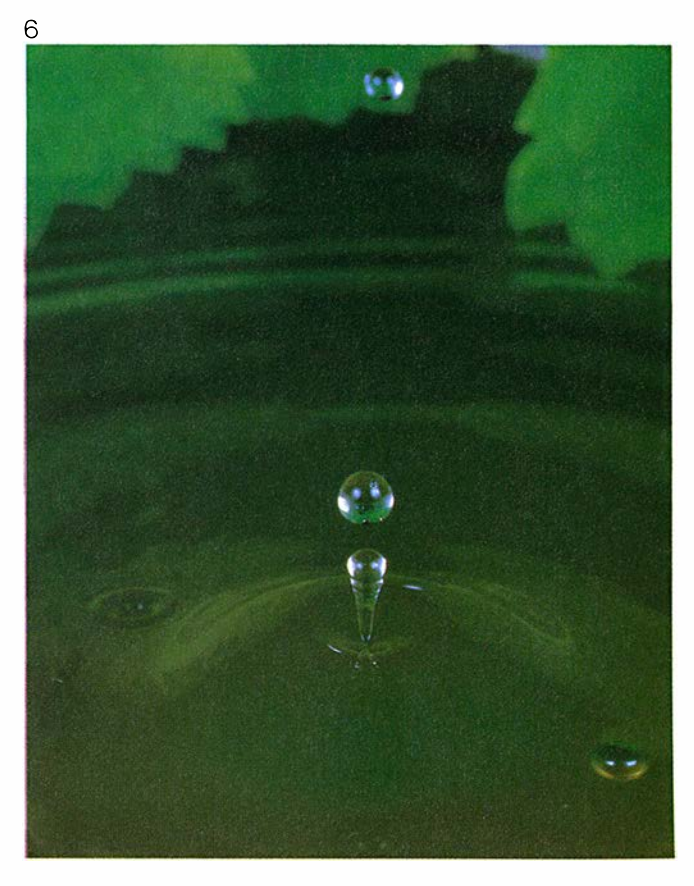
2



5



6



Ingeniería mecánica del Islam Occidental

Los ingenieros musulmanes idearon mecanismos de lujo, a veces con posibilidad de aplicación práctica como relojes de agua o clepsidras, de los que podía disponer la aristocracia de la época para su entretenimiento

Juan Vernet

Cuando los árabes conquistaron España, parece que aún estaban en funcionamiento los acueductos y sifones que cruzaban por el fondo del mar para abastecer de agua a Cádiz, que entonces era una isla. Las leyendas con que algunos árabes quieren justificar su construcción recuerdan las orientales del ingeniero persa Farhad quien, loco de amor por Sirin, esposa del rey sasánida Cosroes II Parviz (590-628), construyó un canal para llevar rápidamente la leche fresca desde las praderas de Armenia hasta el castillo en que habitaba su amada; o las que figuran en algún cuento de *Las mil y una noches.* En al-Andalus es una princesa la que quiere que su ciudad esté a cubierto de cualquier contingencia y, en consecuencia, decide evitar que se le pueda cortar el suministro de agua.

A mediados del siglo IX, los textos nos hablan de un inventor, Abbas b. Firnas, que se lanzó al espacio con un precedente del ala delta. Consiguió volar un trecho, pero acabó lastimándose. Al mismo personaje se atribuye el supuesto invento de una máquina que indicaba la hora del día y de la noche.

En el siglo X sabemos que, en la mezquita de Córdoba, el predicador hablaba a sus fieles desde un púlpito que se colocaba en el lugar conveniente y, después del sermón, se retiraba para guardarlo, adosado junto a la pared, hasta que volviera a necesitarse. El desplazamiento era fácil, pues estaba montado sobre ruedas.

Lo curioso de estas noticias es que se nos menciona a sus constructores —que no tienen que ser necesariamente los inventores— con el nombre genérico de *alarifes*, palabra que conserva el léxico español con el mismo significado que tenía en árabe hace mil años. Cuando Abd al-Rahman III decide enviar ayuda técnica a un aliado suyo del norte de Africa (935), manda al jefe de sus ingenieros, Muhammad b. Walid b. Fustayq, al frente de los más hábiles alarifes, expertos en toda clase de oficios. Gracias a esta ayuda técnica su aliado pudo poner en estado de defensa un viejo castillo.

En la época taifa (siglo XI), Azarquiel, alarife de Toledo en su juventud y luego el más importante astrónomo de al-Andalus, sabemos que construyó junto al Tajo dos clepsidras que indicaban el día del mes lunar y señalaban la hora del día. El ciclo se repetía ininterrumpidamente sin errores excesivos y el aparato en cuestión siguió funcionando, cerca de cuarenta años, después de la conquista de la ciudad por los cristianos de Alfonso VI.

A esta época, aproximadamente, cabe referir la existencia de laúdes que tocaban solos, de cintas transportadoras que servían para trasladar las bebidas y los guisos preparados en la cocina hasta el comedor y, desde aquí, llevarlos, una vez utilizados, por el mismo sistema, al fregadero. El mismo artificio se conocía en Damasco. Igualmente tenemos noticias de máquinas que permitían elevar o bajar las tuberías que llevaban el agua para hacer funcionar los molinos y, en consecuencia, graduar la velocidad de la muela.

En Oriente, conservamos varios tratados, escalonados a lo largo de cuatro siglos (IX-XIII), que permiten reconstruir los mecanismos que se utilizaban. No ocurre lo mismo en Occidente. Por tanto, cuando hace menos de veinte años se descubrió, en la Biblioteca Medicea-Laurenziana de Florencia la existencia de un manuscrito misceláneo andalusí de este género, cuyo primer tratado hablaba de máquinas, los investigadores se lanzaron a analizarlo a pesar de que, como subraya Donald R. Hill, el texto, al menos sus primeras páginas, está muy mutilado (sólo es legible el 60 por ciento), pues los folios fueron guillotinados al bies, casi por la mitad, y la humedad ha estropeado otras partes. Sin embargo, conforme se avanza, la parte legible aumenta y se entienden mejor los dibujos que representan los mecanismos responsables de la acción que figura en el enunciado de actuación de cada máquina.

Pero, afortunadamente, conservamos sin mutilaciones el "plano" de algunas y el correspondiente enunciado en que explica para qué han sido ideadas. Gracias a ello se ha podido reconstruir, y hacer funcionar la primera, y lo mismo se hará, en plazo breve, con la segunda.

El quinto opúsculo contiene un

1. PAGINA DEL MANUSCRITO que se conserva en la Biblioteca Medicea-Laurenziana de Florencia que contiene el *Kitāb-asrār fī natā'iŷ al-afkār* ("Libro de los secretos acerca de los pensamientos"), del ingeniero andalusí de la segunda mitad del siglo XI Aḥmad o Muḥammad ibn Jalaf al-Murādī. Gracias a este manuscrito mutilado hemos podido conocer la existencia de una tradición andalusí en el terreno de la tecnología mecánica de instrumentos de lujo. El libro describe 31 tipos distintos de artilugios mecánicos y un cuadrante solar muy elaborado.

JUAN VERNET es catedrático emérito de árabe de la Universidad de Barcelona y miembro de número de la Academia Internacional de Historia de la Ciencia. Ha escrito numerosas obras sobre astronomía e ingeniería musulmanas.



29

الشكل الثامن عشر

من يريد ان يعمل شكلا مصورا وعليه تمثال وعلى يده كتاب ليعرف به ساعات
النهار وساعات الليل وذلك ان الطالب اذا كملت ساعة من ساعات
النهار او الليل [illegible] التمثال [illegible] التمثال [illegible] ومن
شكل غريب العمل قليل النفقة سهل المؤونة فلنعمل شكلا ثابتا شبيها
بالصور [illegible] ونرسم شكل ا د ح ج ويكون خط ا م [illegible]
ا ب ويكون التمثال جالسا على كرسي على خط ح ر وعلى سطح الشكل
المصور [illegible] ح ك ويكون في هذا الشكل محبس للماء
وبها محبس [illegible]
ويكون [illegible]
[illegible]

tratado sobre ruedas hidráulicas, molinos y presas; no presenta dibujos, aunque están los huecos que debían contenerlos. En realidad, trata de enseñar a construir los móviles perpetuos conocidos en la época. Este quinto es anónimo, pero permite relacionar uno de sus ingenios con otro que figura en el *Carnet* de Villard de Honnecourt.

Las descripciones que se dan en estos tratados primero y quinto manifiestan el estado de la mecánica en al-Andalus y, a su vez, nos permiten entender un texto en que se describe cómo *El Corán* de la Gran Mezquita de Marrakus salía de su armario y se abría ante los lectores de modo automático.

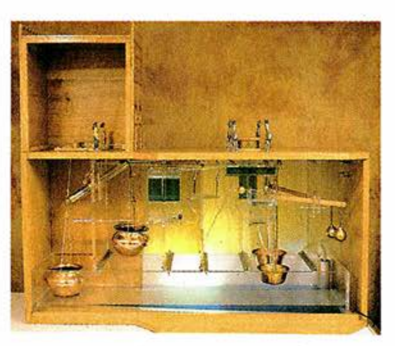
El manuscrito nos informa de que fue copiado —de otro anterior— por Ishaq b. al-Sid, quien trabajó al servicio de Alfonso X el Sabio. El original era de un tal Ahmad o Muhammad b. Jalaf al-Muradi, "apellido" éste bastante frecuente en al-Andalus del siglo XI, quien escribió su obra *Libro de los secretos de los pensamientos*, destinada a enseñar a construir juguetes mecánicos, muchos de los cuales se pueden utilizar como relojes de agua (clepsidras).

Veamos cómo se ha procedido en la reconstrucción de la máquina, que denominaremos *uno.* El texto que se encuentra en la parte no mutilada de la página indica la representación teatral que debe desarrollarle: consiste en que dos muchachas encerradas en sus respectivos pabellones salgan (a un jardín). Cuatro gacelas empiezan a beber y un negro surge del fondo de un pozo para espiarlas. Al cabo de un momento aparecen tres serpientes que asustan a todos los actores que corren a esconderse en los lugares en que se encontraban al iniciarse la acción.

La representación se desarrolla encima de la cara de una caja que tiene la forma de un paralelepípedo rectangular, aunque la parte superior pueda sufrir ligeras modificaciones, como es su transformación en un octógono. Debajo, escondidas, se encuentran tres balanzas de agua, las cuerdas, los tubos, válvulas, poleas, etcétera, que desencadenarán, sucesivamente, los movimientos de cada pieza previstos por el constructor. Hay que subrayar que el aparato permite que la representación se realice con los intervalos de tiempo que se deseen. Si se quiere que funcione como reloj, bastará con hacer que la acción se repita de hora en hora.

Para conseguir su funcionamiento correcto, es necesario que el depósito de agua que alimenta los distintos platillos de las balanzas mantenga siempre el mismo nivel, lo que conseguían con procedimientos ya conocidos en la Antigüedad, como el de instalar dos depósitos a distinto nivel. El más alto vertía el agua en el de debajo en mayor cantidad de la que éste podía contener, razón por la cual el líquido que alimentaba el depósito inferior conseguía luego fluir con velocidad constante en la clepsidra. En cambio, constituye una innovación el llenar con cierta cantidad de mercurio uno de los brazos de la balanza principal, para desencadenar la secuencia de los movimientos programados, a diferencia de lo que ocurría con los medios empleados hasta entonces, por ejemplo, bolas de metal.

Mecanismos de operación

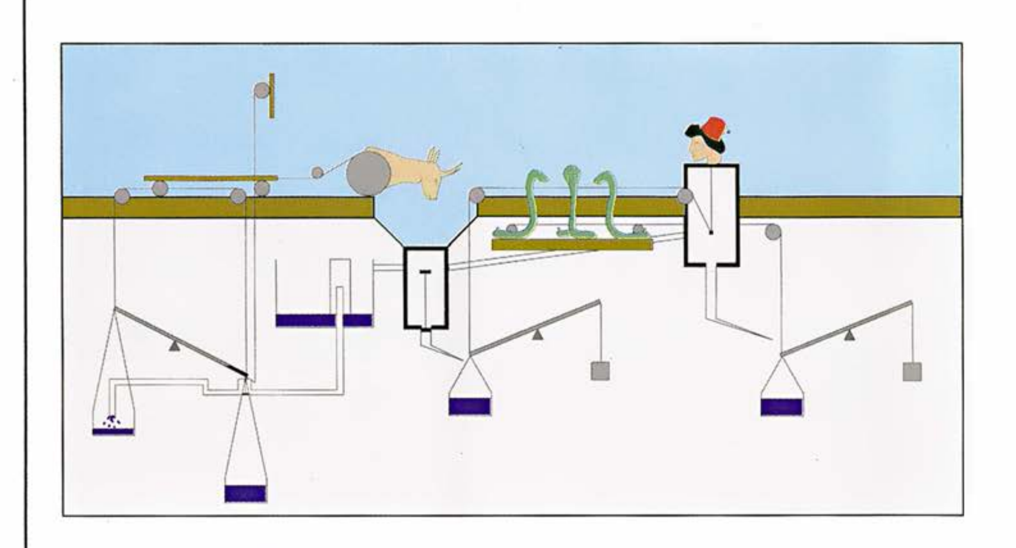


RECONSTRUCCION de la clepsidra por Eduard Farré de acuerdo con la descripción de Vernet, Casals y Villuendas.

En el funcionamiento de la clepsidra que describe el *Kitāb asrār fī natāiŷ al-afkār,* distinguimos un mecanismo fundamental, un mecanismo secundario y un mecanismo de puesta a cero.

En el *mecanismo fundamental,* la pieza decisiva es la balanza, cuyos platillos cargan agua uno después del otro para crear una serie de movimientos alternativos: apertura y cierre de la puerta de la caja; avance y retroceso del carrito en que están montadas las esclavas; movimiento de las gacelas que beben, se ponen alerta o levantan la cabeza. Se producen también el desplazamiento de una válvula (*jirz*) que cierra la alimentación del agua de un platillo, con lo cual ésta se dirige hacia el otro platillo, y el desplazamiento de la masa móvil de una libra de mercurio a lo largo de los brazos de la balanza para dar lugar a la histéresis del sistema, según se ilustra en las tres figuras sucesivas.

El *mecanismo secundario* descansa en una segunda balanza, uno de cuyos platillos tiene una masa variable en función del agua que puede acumularse en el mismo y es antagónica de una masa constante. La posición de los brazos de la balanza en cuestión



La segunda máquina, o *dos*, presenta a un par de caballeros, lanza en ristre, que corren, uno después de otro, en busca de sendos soldados que se encuentran en el extremo opuesto de una de las superficies de la caja. Esta se divide en dos mitades, pistas, y en la línea de separación se hallan uno o dos címbalos.

Por el centro de cada una de las pistas corren los caballeros. Hacia la mitad de la carrera se encuentra una muchacha que levantará los brazos en señal de saludo y, a la izquierda (o derecha, según el caso), el címbalo que golpeará al caballero al cruzarlo ("dando" así, si se quiere, la hora). Pero, conforme se aproxima al infante, éste se va escondiendo, por lo cual, al llegar al sitio donde se encontraba el enemigo, el caballero da media vuelta y regresa. La muchacha, que había bajado los brazos durante el ataque, vuelve a levantarlos ahora. En la segunda pista se realiza una acción equivalente al de la primera, de tal modo que su caballero inicia la marcha en el momento en que el primero gira al no alcanzar al infante.

El mecanismo de esta máquina puede funcionar gracias a una rueda de molino de eje vertical, rodete, si existe una fuerte presión del agua, o bien, horizontal, tipo noria, si el flujo es lento. Sobre este eje motor —el horizontal— se encuentra una rueda que tiene 64 dientes al lado de diámetro y ninguno en el otro, lo cual le permite engranar, alternativamente, con dos piñones opuestos, creándose así movimientos alternativos de vaivén.

Igualmente, las cuerdas que han de arrastrar a los caballos se arrollan en una devanadera en forma de cruz y no en un tambor o carrete, con lo cual los animales dan la impresión de moverse a saltos. Otro de los elementos importantes de esta máquina es el de una varilla articulada cerca de la periferia de una rueda que permite transformar el movimiento circular en lineal, constituyendo así un precedente del mecanismo de biela-manivela. Gracias a ello, la muchacha levanta y baja los brazos alternativamente durante la representación.

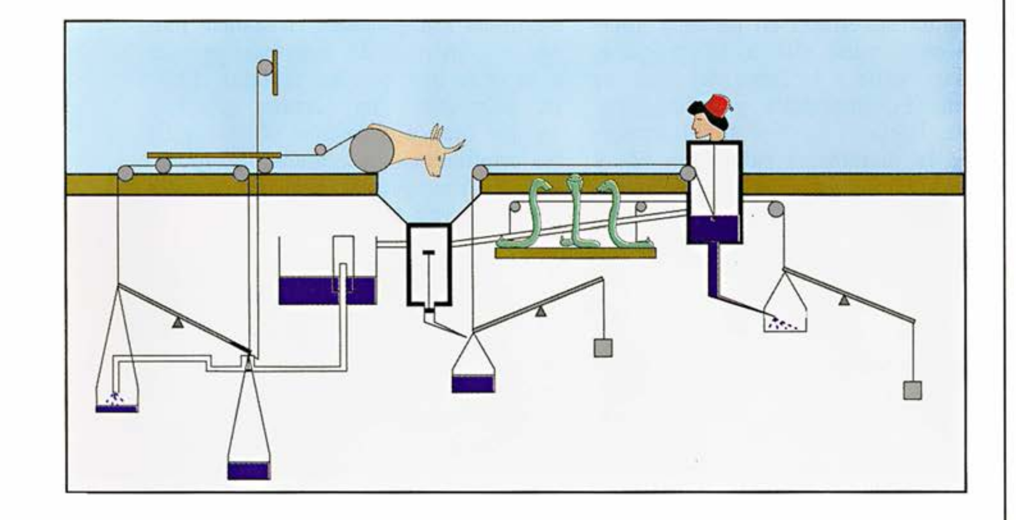
La parte del manuscrito en que se describen las máquinas tercera, cuarta y quinta se encuentra en mal estado de conservación, al menos en algunos lugares estratégicos, y, por el momento, no los hemos podido reconstruir. De todos modos, se puede deducir que sus mecanismos son similares a los empleados en las dos primeras máquinas y, a partir de trozos legibles pero aislados, se ve que introducen el uso de cintas correderas.

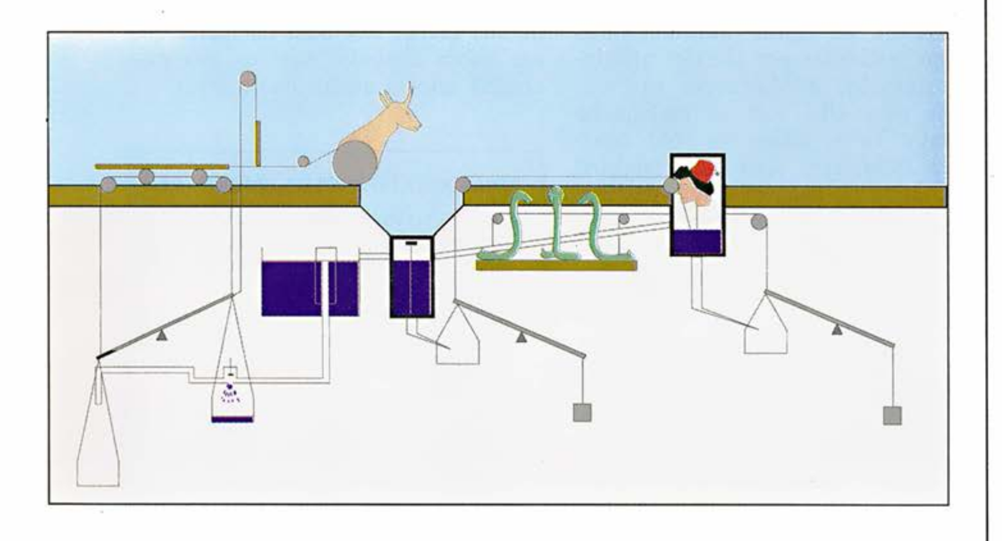
Pasemos al *quinto* opúsculo que trata, en buena parte, de móviles perpetuos. De la breve descripción que dimos, hace unos quince años, no podía deducirse la palabras, en letra pequeñísima, añadidas al mismo. Más tarde, en 1982 analicé con detalle en en un simposio celebrado en Cuelgamuros el opúsculo en cuestión y subrayé el parentesco del mismo con el de otro, traducido al alemán por Schmeller en 1922. Destaqué entonces la importancia de la expresión contenida en las letras menudas: ruedas hidráulicas que se mueven *por sí mismas*. El texto no se publicaría hasta 1988.

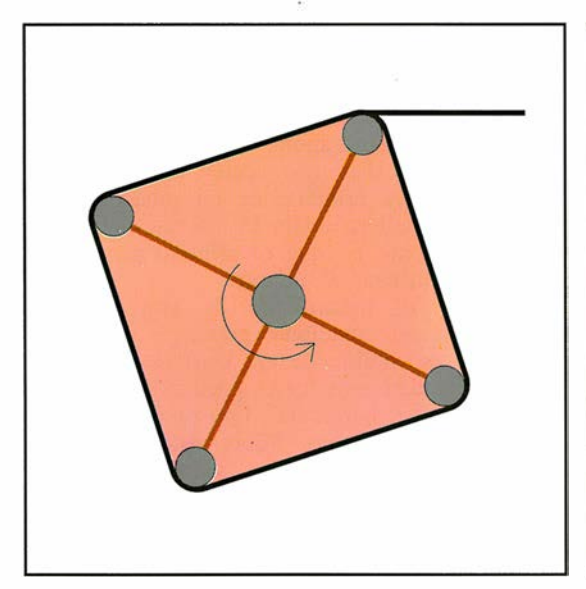
de la clepsidra de las gacelas

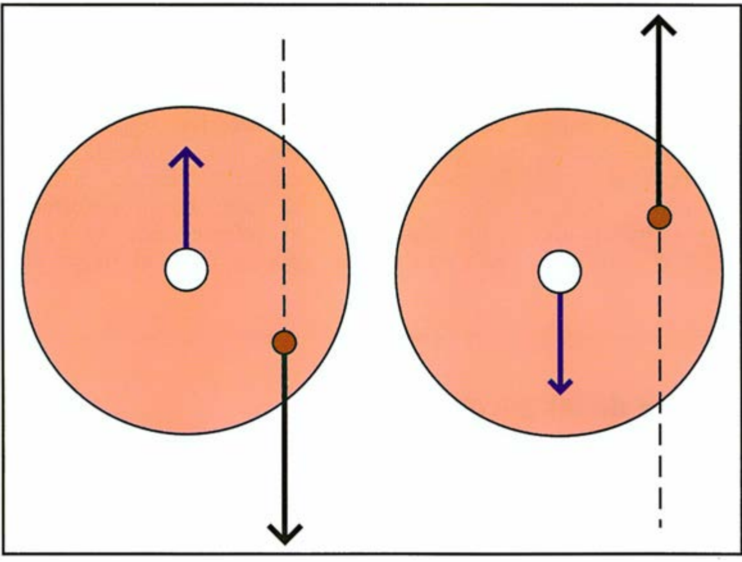
será función de la relación entre la masa del platillo más el agua que éste haya recibido y la masa constante citada. Su movimiento crea una maniobra de carácter diversivo: aparición de un negro que observa a las esclavas y que es de hecho la puesta en marcha del proceso de puesta a cero de la máquina, es decir, del fin de su funcionamiento.

Por último, el *mecanismo de puesta a cero* reposa sobre una tercera balanza, de un solo platillo y masa constante antagónica de éste y del agua que pueda recibir. Su oscilación motiva la aparición de tres serpientes, que justifica una serie de movimientos: el negro que mira a las esclavas se esconde, huida de las esclavas hacia el interior de la caja (casa) y cierre de la puerta de la misma. Las gacelas levantan entonces las cabezas.









2. DEVANADERA EN CRUZ. Gracias a este recurso técnico, el caballo de cierto juego mecánico de lucha entre jinetes va al trote y no al paso.

3. EN ESE MISMO JUEGO DEL TORNEO, la máquina transforma el movimiento circular en lineal. Los alarifes andaluces eran consumados maestros en esos ingenios.

Una de las ruedas descritas coincide con la dibujada en el *Carnet* de Villard de Honnecourt, técnico francés de la segunda mitad del siglo XII. Dice éste: "Muchas veces los sabios han discutido cómo se puede hacer girar una rueda *por sí sola*. Aquí tenéis cómo se puede hacer con martillos en número impar o con mercurio". Este y otros detalles, en los que aquí no voy a entrar, permiten asegurar que el autor francés sabía bien lo que ocurría en el mundo árabe. Añadamos sólo que los autores de ambos opúsculos describen varios móviles perpetuos, y demuestran conocer algunas máquinas hidráulicas, los distintos tipos de engranajes (de cualquier número de dientes), las ruedas catalinas, muy probablemente el tornillo sin fin y las ruedas locas.

Pero esta tecnología andalusí no sólo se extendió hacia el norte, hacia Europa, sino también hacia el sur. Es sabido que la gran mezquita de Córdoba pretendía conservar en su seno *El Corán* que estaba leyendo el califa ^{c}Utman cuando fue asesinado (en el año 654). El ejemplar en cuestión era venerado por los musulmanes, pues estaba manchado con la sangre del califa mártir, y se conservaba con el máximo cuidado. En 1158 se trasladó a Marrakus y aquí se inventaron una serie de mecanismos que permitían manejarlo y leerlo sin que le tocasen, ni por azar, unas manos impuras, tal como exige la tradición musulmana.

Sabemos que estaba colocado sobre un atril en aspa, mueble auxiliar que todavía encontramos en el mundo musulmán, e instalado encima de una plataforma móvil. Todo ello —*El Corán*, atril y plataforma— se mantenía encerrado en un arca guardada en la parte alta de la mezquita. Al dar vuelta a la llave del arca, se abrían (1), inmediata y automáticamente, hacia el interior sus dos puertas y la plataforma salía sola (2) y llevaba *El Corán* al lugar más alejado posible previsto. Simultáneamente (3), el atril en *X* se desplegaba, mientras las puertas del arca se cerraban (4). Al introducir de nuevo la llave en la cerradura del arca y girarla en sentido contrario, se reproducían, en sentido inverso, los cuatro movimientos citados, gracias a las "correas y mecanismos escondidos en el interior de la plataforma". Todo ello, evidentemente, podía conseguirse con los artificios descritos por al-Muradi.

Muchos de estos automatismos fueron realizadas por alarifes andaluces, llamados a Marruecos expresamente para ello. Así, el malagueño al-Hayy Ya^{c}is, quien no sólo construyó Gibraltar, sino que también automatizó la macsura (lugar destinado al califa) y el almimbar (o púlpito) de la segunda Kutubiyya: montó a su lado una sala de motores (*harakat*) para que las paredes de gran tamaño —ya no juguetes, pues— se movieran simultáneamente. Al-Maqqari, historiador argelino especializado en la historia de la España musulmana, visitó el lugar en 1601 y aún alcanzó a ver sus restos.

También cabe pensar en el procedimiento seguido por estos alarifes para concebir y ejecutar sus obras. Si hacemos caso de un *excursus* que se encuentra en el comentario de *El Corán* de Fajr al-Din al-Razi, del siglo XIII, debían empezar, en los ejemplos complicados, trazando planos y construyendo maquetas previas a la obra que querían realizar. Existe, asimismo, una curiosa anécdota en que parece reflejarse el temor de los arquitectos a adelantar presupuestos. El presupuesto real se conocía sólo una vez terminada.

Lo dicho muestra que, en Occidente, la mecánica musulmana tuvo en algunos casos una utilidad práctica. Por otro lado, la terminología empleada aquí difiere de la de Oriente en algunos términos significativos. La palabra corriente con que se designa esta ciencia allí es *hiyal*, y aquí handasa. Y, además, ciertos conceptos cambian: si en las clepsidras orientales la hora la da un ave que suelta de sus garras una bola de metal que cae sobre címbalo, aquí es una muchacha que la suelta de la boca.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL CAPÍTULO PRIMERO DEL "KITĀB ASRĀR FI NATĀ'IŶ AL-AFKĀR". J. Vernet, R. Casals y M.V. Villuendas en *Awraq*, vol. 5-6, págs. 7-18; 1983.

TECNOLOGÍA ANDALUSÍ. Donald R. Hill en *El legado científico andalusí*; págs. 157-172. Museo Arqueológico Nacional, Madrid, 1992.

EL LEGADO CIENTÍFICO ANDALUSÍ. CATÁLOGO DE LA EXPOSICIÓN CELEBRADA EN EL MUSEO ARQUEOLÓGICO NACIONAL. MADRID, ABRIL-JUNIO, 1992. Comisarios: Juan Vernet y Julio Samsó. Centro Nacional de Exposiciones. Ministerio de Cultura, Madrid, 1992.

Electrodinámica cuántica en cavidades

Instalados en cavidades pequeñas, los átomos y los fotones muestran un comportamiento distinto del que ofrecen en el espacio libre. Ilustran, en tal caso, ciertos principios de la física cuántica y permiten el desarrollo de nuevos sensores

Serge Haroche y Jean-Michel Raimond

Las transiciones rápidas y espontáneas están omnipresentes en el mundo cuántico. Una vez desencadenadas, parecen tan incontrolables e irreversibles como una traca de fuegos artificiales. Los átomos excitados, por ejemplo, descargan su exceso de energía en forma de fotones, que escapan hacia el infinito a la velocidad de la luz. A lo largo de los últimos diez años, sin embargo, esta inevitabilidad ha empezado a ser domeñada: se han creado dispositivos que frenan las transiciones espontáneas, que las paran, las aceleran e incluso las invierten completamente.

La empresa ha sido posible gracias a recientes adelantos en la fabricación de pequeñas cavidades superconductoras y otras estructuras microscópicas, y a nuevas técnicas de manipulación de los átomos mediante láseres. La longitud de onda de los fotones que emita o absorba un átomo situado dentro de una pequeña caja con paredes reflectoras está constreñida, y, al estarlo, lo están los cambios de estado que aquél experimente. Se ha logrado así que un átomo determinado emita fotones antes de tiempo, que permanezca en un estado excitado indefinidamente o que bloquee el paso de un haz láser. Con un mayor refinamiento de esta técnica, los fenómenos de la electrodinámica cuántica (EDC) en cavidades podrán aprovecharse para generar campos electromagnéticos que consten de un puñado de fotones, con su medición precisa. Los procesos de la EDC en cavidades engendran una íntima correlación entre los estados del átomo y los del campo, de manera que su estudio nos proporciona nuevas pistas para mejor conocer los aspectos cuánticos de la interacción entre luz y materia.

Para entender la interacción entre un átomo excitado y una cavidad, deben tenerse en cuenta dos clases de física: la clásica y la cuántica. La emisión de luz por un átomo sirve de puente entre ambos mundos. Las ondas de luz son oscilaciones móviles de campos eléctricos y magnéticos. En este respecto, representan un suceso clásico. Pero la luz puede también describirse por medio de fotones, cuantos de energía emitidos de manera discreta. En algunas ocasiones el modelo clásico resulta más idóneo, y en otras el cuántico ofrece una mejor comprensión.

Cuando un electrón de un átomo pasa de un nivel de energía alto a otro más bajo, el átomo emite un fotón que lleva consigo la diferencia de energía entre los dos niveles. Este fotón tiene una longitud de onda de una micra, o casi, lo que corresponde a una frecuencia de centenares de terahertz, pocos, y una energía de cerca de un electronvolt. Un estado excitado posee una vida media natural —similar a la semivida de los elementos radiactivos— que determina las posibilidades de que el átomo excitado emita un fotón durante un intervalo de tiempo dado. La probabilidad de que un átomo permanezca excitado decrece según una curva exponencial: a una mitad después de un tic del reloj interno, a un cuarto después de dos tics, a un octavo después de tres, y así sucesivamente.

En términos clásicos, el electrón más externo de un átomo excitado es equivalente a una pequeña antena, oscilando a frecuencias que corresponden a la energía de transiciones a estados menos excitados, mientras que el fotón sería el campo radiado por la antena. Pero si el átomo absorbe luz y sube a un nivel de energía más alto, actuará a modo de antena receptora.

Sin embargo, si la antena está dentro de una cavidad reflectora su comportamiento cambia —como sabe todo aquel que haya intentado oír la radio mientras conduce por un túnel—. Mientras el coche y su antena receptora pasan bajo tierra, están en una región donde las longitudes de onda largas de las ondas de radio se cortan. Las ondas incidentes interfieren destructivamente con las que rebotan en los muros de hormigón reforzado con acero del túnel. De hecho, las ondas de radio no se pueden propagar a no ser que los muros del túnel estén separados por más de una mitad de la longitud de onda. Ésta es la anchura mínima que permite el desarrollo de una onda estacionaria con, al menos, una cresta o máximo del campo, lo mismo que la vibración de una cuerda de violín alcanza un máximo en el medio de la cuerda y se anula en los extremos. Lo que es verdad para la recepción también lo es para la emisión: una antena confinada no puede emitir a longitudes de onda largas.

Un átomo excitado en una pequeña cavidad es precisamente una antena así, aunque microscópica. Si la cavidad es lo suficientemente pequeña, el átomo va a ser incapaz de radiar porque la longitud de onda del campo oscilatorio que "querría" pro-

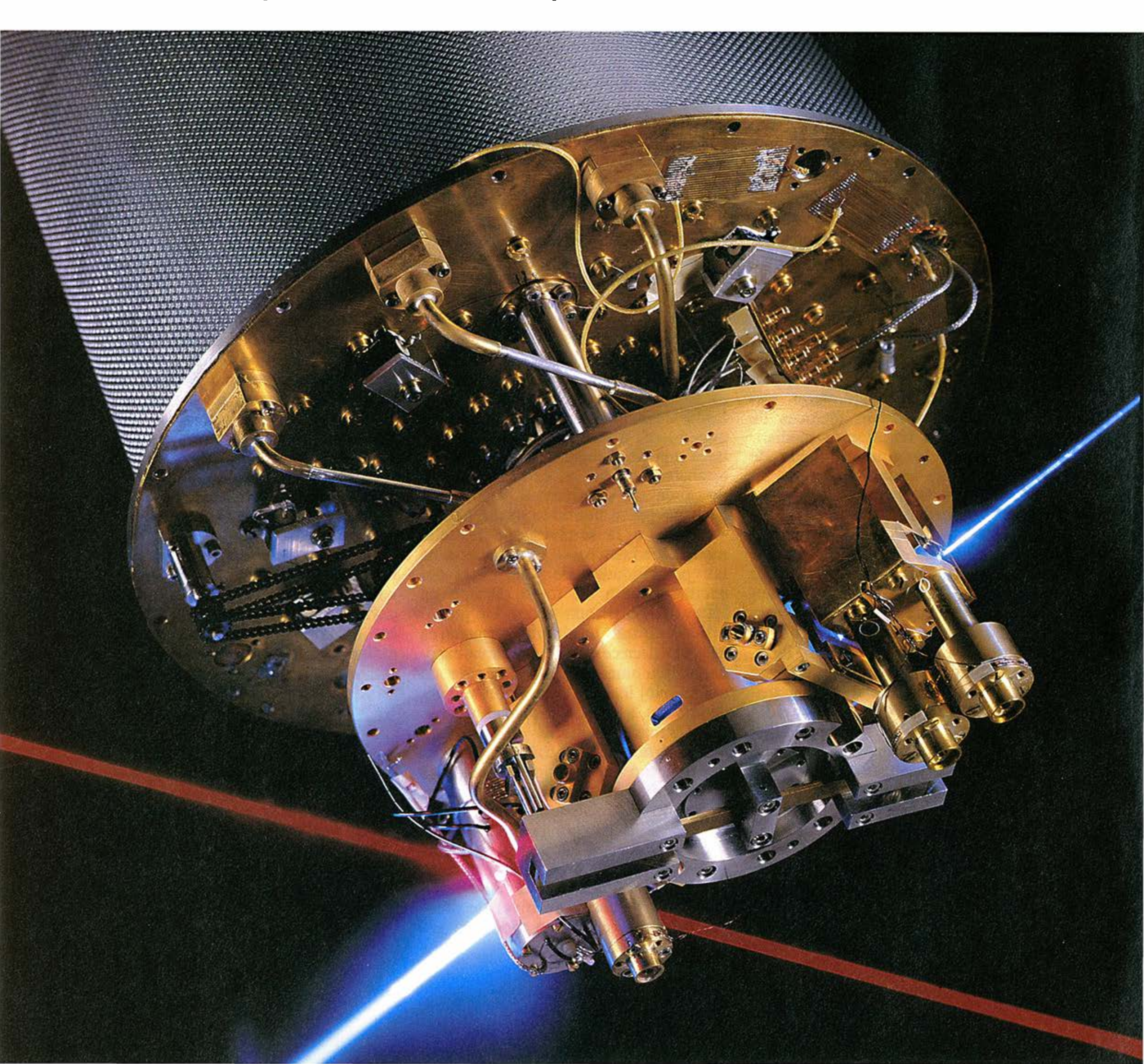
SERGE HAROCHE y JEAN-MICHEL RAIMOND trabajan en la École Normale Supérieure (ENS) de París. Llevan estudiando los átomos en cavidades unos 10 años. Haroche, doctorado en 1971, enseña física en la Universidad de París VI desde 1975. En 1991 entró en el Institut Universitaire de France, de reciente creación. Raimond, que se formó como el anterior en la ENS y se doctoró en 1984, da clases también en la Universidad de París VI.

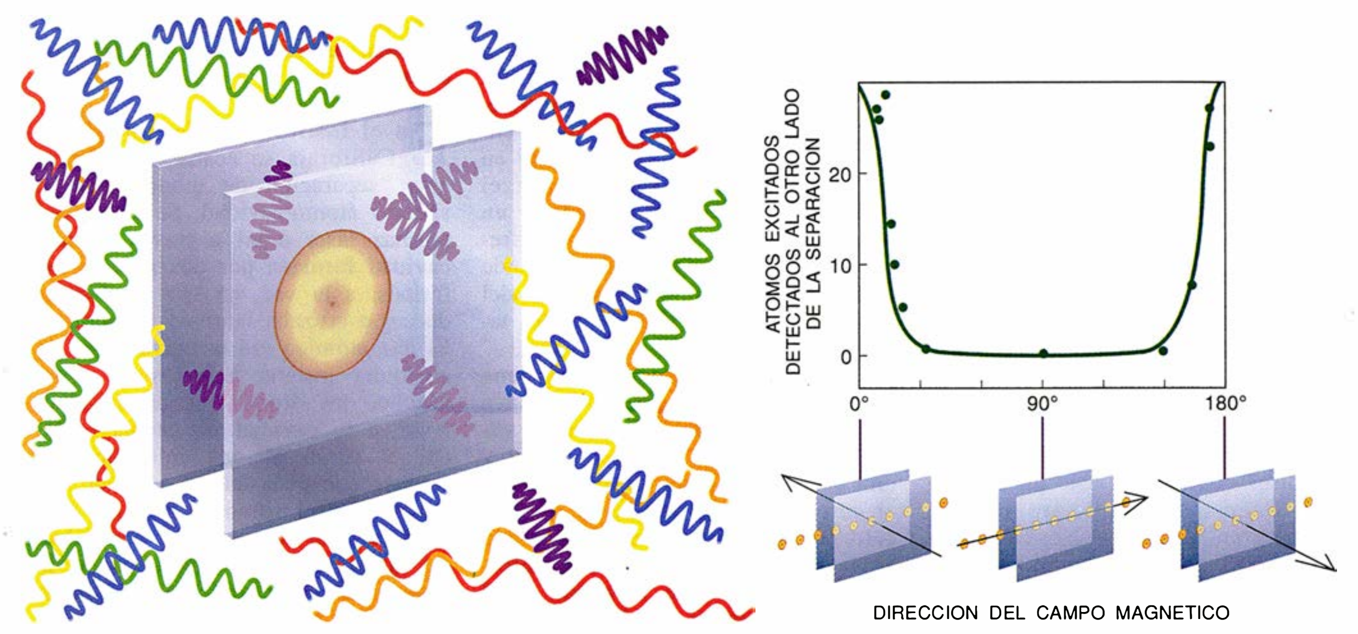
ducir no se puede ajustar dentro de las condiciones de contorno. Mientras el átomo no pueda emitir un fotón, debe permanecer en el mismo nivel de energía; el estado excitado adquiere una vida media infinita.

En 1985 grupos de la Universidad de Washington en Seattle y del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) demostraron la supresión de la emisión. El grupo de Seattle inhibió la radiación de un electrón dentro de una trampa electromagnética, mientras que el grupo del MIT estudió átomos excitados confinados entre dos placas metálicas separadas más o menos un cuarto de milímetro. Los átomos permanecieron en el mismo estado, sin radiar, mientras estuvieron entre las placas.

Las estructuras de la escala del milímetro son, con mucho, demasiado anchas para alterar el comportamiento de átomos excitados convencionalmente, que emiten radiación de micras o submicras; en consecuencia, los del MIT debieron trabajar con átomos en estados de Rydberg. Un átomo en un estado de Rydberg tiene casi suficiente energía como para perder por completo un electrón. Dado que este electrón externo se halla ligado sólo débilmente, puede encontrarse en cualquier nivel energético comprendido entre un gran número de niveles muy juntos, y los fotones que emite al saltar de uno al otro tienen longitudes de onda comprendidas en un intervalo que va desde una fracción de milímetro a unos pocos centímetros. Para preparar átomos de Rydberg, de amplio uso en los experimentos de EDC en cavidades, se irradian, con luz láser de longitudes de onda apropiadas, átomos que estén en el nivel fundamental.

La supresión de la emisión espontánea a una frecuencia óptica requiere cavidades mucho menores. En 1986 uno de nosotros (Haroche), con otros físicos de la Universidad de Yale, construyó una estructura cuya anchura era de una micra fijando dos espejos ópticamente planos, separados por espaciadores metálicos finísimos. Se lanzaron átomos a través de este pasadizo; así se logró que durante 13 veces el tiempo normal de vida media del estado exci-





2. LOS ATOMOS EXCITADOS entre dos espejos (*izquierda*) no pueden emitir un fotón. El átomo es sensible a las fluctuaciones del vacío de gran longitud de onda cuya polarización es paralela a los espejos, pero la estrechez de la cavidad las impide. Los átomos que atraviesan el hiato micrométrico entre espejos han permanecido en el estado excitado durante 13 vidas medias naturales. La exposición de los átomos a un campo magnético provoca la precesión de sus ejes dipolares y cambia la transmisión de los átomos excitados a través de la separación (*derecha*). Cuando el campo es paralelo a los espejos, el átomo gira fuera del plano de los espejos y pierde en seguida su excitación.

tado no radiasen. En la Universidad de Roma se han empleado separaciones de una micra de anchura similares para inhibir la emisión por parte de moléculas de colorantes excitadas.

Los experimentos realizados con átomos entre dos espejos planos tienen una característica interesante. Este tipo de estructura, sin paredes laterales, constriñe la longitud de onda sólo de los fotones cuya polarización sea paralela a los espejos. Como resultado, la emisión se inhibe en el caso exclusivo de que la antena dipolar atómica oscile a lo largo del plano de los espejos. (En los experimentos de inhibición de emisión espontánea del MIT y de Yale, por ejemplo, fue esencial preparar los átomos excitados de manera que tuviesen orientación dipolar.) En Yale los físicos demostraron la realidad de estos efectos de dependencia en la polarización: giraron el dipolo atómico entre los espejos con la ayuda de un campo magnético; cuando la orientación del dipolo estaba inclinada respecto al plano de los espejos, la vida media del estado excitado disminuía notablemente.

1. EL APARATO DE EDC en cavidades, instalado en el laboratorio de los autores, consta de una zona de excitación, donde se prepara un haz de átomos en estados altamente excitados (*izquierda*), y un receptáculo que rodea una cavidad superconductora de niobio (*centro*). Detectores de ionización (*derecha*) determinan el estado de los átomos después de que hayan pasado por la cavidad. El haz láser rojo traza la línea del láser de infrarrojos que se utiliza para excitar los átomos; el haz azul señala el camino de los átomos. Cuando está en funcionamiento, todo el aparato se encierra en un criostato de helio líquido que lo enfría a menos de un kelvin.

La supresión de emisión también tiene lugar en cavidades de estado sólido, minúsculas regiones de semiconductor limitadas por capas de diferentes substancias. Los físicos del estado sólido producen estructuras de las dimensiones de la submicra gracias a la epitaxia de haces moleculares, en la que los materiales se forman mediante el depósito de capas atómicas una a una. Los dispositivos construidos para aprovechar los fenómenos de la EDC en cavidades pueden alumbrar una nueva generación de emisores de luz (véase “Microláseres”, por Jack L. Jewell, James P. Harbison y Axel Scherer; INVESTIGACION Y CIENCIA, enero de 1992).

Estos experimentos indican la existencia de un fenómeno contrario a la intuición, que podría denominarse “interferencia sin fotones”. En breve, la cavidad evita que un átomo emita un fotón porque este fotón interferiría destructivamente consigo mismo si llegase a existir. Pero esto lleva a una cuestión filosófica: ¿cómo puede “saber” el fotón, incluso antes de ser emitido, si la cavidad tiene o no el tamaño correcto?

Parte de la respuesta se encuentra en otro extraño resultado de la mecánica cuántica. Una cavidad sin ningún fotón se halla en su estado de energía más bajo, el estado fundamental, pero no está realmente vacía. El principio de incertidumbre de Heisenberg establece un límite inferior para el producto de los campos eléctrico y magnético dentro de la cavidad (o en cualquier otro sitio), y evita así que se anulen simultáneamente. Este campo del vacío presenta fluctuaciones intrínsecas de todas las frecuencias, desde las largas ondas de radio hasta el visible, la radiación ultravioleta y la gamma, y es un concepto crucial en física teórica. La emisión espontánea de un fotón por un átomo excitado viene, en cierto sentido, inducida por las fluctuaciones del vacío.

El efecto de interferencia sin fotones aparece porque las fluctuaciones del campo del vacío están, como las oscilaciones de las ondas electromagnéticas más corrientes, limitadas por las paredes de la cavidad. En una pequeña caja, las condiciones de contorno prohíben las longitudes de onda largas —no puede, pues, haber fluctuaciones del vacío a bajas frecuencias—. Un átomo excitado que ordinariamente emitiría un fotón de baja frecuencia no lo hará, al no existir fluctuaciones del vacío que,

oscilando en fase con él, estimulen su emisión.

Las pequeñas cavidades suprimen las transiciones atómicas; ligeramente mayores, sin embargo, pueden incrementarlas. Cuando el tamaño de una cavidad que rodea un átomo excitado aumenta hasta coincidir con la longitud de onda del fotón que el átomo emitiría de manera natural, las fluctuaciones del campo del vacío a esta longitud de onda inundan la cavidad y se hacen más intensas que en el espacio libre. Este estado de cosas alienta la emisión; la vida media del estado excitado se vuelve mucho más corta que lo que sería de suyo. Nosotros observamos este incremento de la emisión con átomos de Rydberg en la Escuela Normal Superior (ENS) de París durante uno de los primeros experimentos de EDC en cavidades; acontecía en 1983.

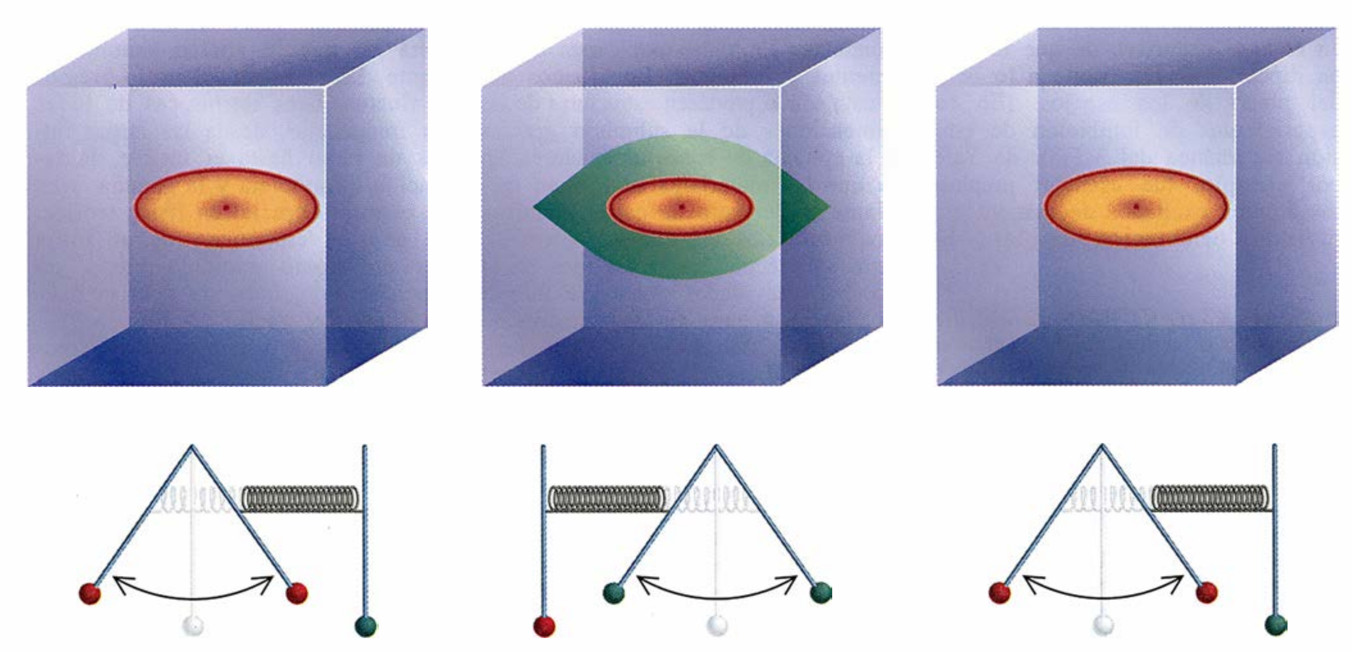
Si la cavidad resonante tiene paredes absorbentes o permite que los fotones escapen, la emisión no diferirá de la radiación espontánea en el espacio libre; sólo se realizará más deprisa. Pero si las paredes de la cavidad son muy reflectoras y la cavidad es cerrada ocurren nuevos efectos. Estos, que dependen de estrechas interacciones duraderas entre el átomo excitado y la cavidad, constituyen la base de toda una serie de nuevos dispositivos capaces de realizar mediciones precisas de fenómenos cuánticos.

En vez de limitarse a emitir un fotón y continuar su camino, un átomo excitado en una cavidad resonante de ese estilo oscila arriba y abajo entre sus estados excitado y no excitado. El fotón emitido permanece en la caja en las proximidades del átomo y es rápidamente reabsorbido. El sistema átomo-cavidad oscila entre dos estados, uno que consiste en un átomo excitado sin fotón, y el otro en un átomo no excitado y un fotón atrapado en la cavidad. La frecuencia de esta oscilación depende de la energía de la transición, del tamaño del dipolo atómico y del tamaño de la cavidad.

El intercambio átomo-fotón tiene una profunda analogía en la física clásica. Si dos péndulos idénticos están acoplados por un muelle débil y uno de ellos se pone en movimiento, el otro empezará pronto a oscilar; entonces el primero se irá parando gradualmente. Una vez se haya detenido, el proceso se invertirá, y el primer péndulo se pondrá de nuevo a oscilar. Empezará así un intercambio de energía, sin fin en el caso ideal. El estado en el que un péndulo está excitado y el otro en reposo es no estacionario, porque la energía se mueve sin cesar de un péndulo al otro. Ahora bien, el sistema tiene dos estados estables: en uno de ellos, los dos péndulos oscilan en fase; en el otro, se acercan y alejan alternativamente. La oscilación del sistema en cada uno de estos "modos propios" difiere debido a la fuerza adicional impuesta por el acoplamiento —los péndulos oscilan un poco más lentamente en fase y un poco más rápidamente fuera de ella—. Además, la diferencia de frecuencias entre los dos modos propios es igual al ritmo con el que los dos péndulos intercambian su energía en los estados no estacionarios.

En el Instituto de Tecnología de California se acaba de observar esta "separación de modos" en un sistema átomo-cavidad. Se transmitió un haz láser débil a través de una cavidad formada por dos espejos esféricos; a la vez, un haz de átomos de cesio cruzaba también la cavidad. El haz atómico era tan tenue, que en cualquier instante había sólo, como mucho, un átomo en la cavidad. Aunque la cavidad no estaba cerrada, el ritmo al que intercambiaba fotones con cada átomo excitado era mayor que el ritmo al que los átomos emitían fotones que escapaban de la cavidad; en consecuencia, la física era esencialmente la misma que en un resonador cerrado.

La separación entre los espejos era un múltiplo entero de la longitud de onda de la transición entre el primer estado excitado del cesio y su estado fundamental. Los experimentadores variaron la longitud de onda (y por tanto la frecuencia) del láser y registraron su transmisión a través de la cavidad. Cuando la cavidad estaba vacía, la transmisión alcanzaba un máximo pronunciado en la frecuencia de resonancia de la cavidad. Sin embargo, cuando el resonador contenía en promedio un átomo, aparecía un doble pico simétrico; su valle coincidía con la posición del único pico anterior. La frecuencia de separación, de unos seis megahertz, indicaba el ritmo de intercambio de



3. EN UNA CAVIDAD con paredes muy reflectantes, podemos modelar un átomo mediante dos péndulos débilmente acoplados. El sistema oscila entre dos estados. En uno de ellos el átomo está excitado pero no hay ningún fotón en la cavidad (*izquierda y derecha*). En el otro, el átomo está desexcitado, y la cavidad contiene un fotón (*centro*). El átomo y la cavidad intercambian energía sin cesar.

energía entre el átomo y un único fotón en la cavidad.

Se trata de un aparato de extrema sensibilidad: cuando el láser está sintonizado a la frecuencia de resonancia de la cavidad, el paso de un solo átomo reduce la transmisión de manera significativa. Podemos aprovechar el fenómeno para contar átomos, igual que se cuentan los coches o la gente que interceptan una luz infrarroja frente a un fotodetector.

Aunque se trate de un experimento en principio sencillo, su realización técnica es harto delicada. La cavidad debe ser tan pequeña cuanto sea posible, pues la frecuencia de separación es proporcional a la amplitud del campo del vacío, y ésta, inversamente proporcional a la raíz cuadrada del volumen de la caja. Ha de escogerse entre los mejores espejos reflectores, de manera que el fotón quede atrapado al menos el tiempo que tarden el átomo y la cavidad en intercambiar un fotón. El grupo de Caltech usó espejos cuyo recubrimiento alcanzaba hasta un 99,996 por ciento de reflectividad; distaban alrededor de un milímetro entre sí. En una trampa de este tipo, el fotón rebota a un lado y otro unas 100.000 veces durante el curso de un cuarto de microsegundo antes de ser transmitido a través de los espejos.

Se han conseguido tiempos de almacenamiento mayores —hasta varios centenares de milisegundos— mediante cavidades superconductoras de niobio enfriadas a temperaturas de aproximadamente un kelvin o menos. Estas cavidades son ideales para atrapar los fotones emitidos por átomos de Rydberg, con longitudes de onda que van de escasos milímetros a unos centímetros (lo que corresponde a frecuencias entre 10 y 100 gigahertz). En un experimento reciente en nuestro laboratorio de la ENS, excitamos átomos de rubidio con láseres y los enviamos, a través de una cavidad cilíndrica superconductora sintonizada a la transición de ese estado excitado, a otro nivel de Rydberg cuya energía era superior en 68 gigahertz. Observamos una separación de modos de unos 100 kilohertz cuando la cavidad contenía dos o tres átomos al mismo tiempo.

Existe una sorprendente similitud entre el sistema átomo-cavidad y un láser o un máser. Ambos dispositivos, que emiten fotones en el dominio óptico y de microondas respectivamente, constan de una cavidad sintonizada y un medio atómico que pueda experimentar transiciones cuya longitud de onda coincida con la longitud de la cavidad. Cuando se suministra energía al medio, el campo de radiación del interior de la cavidad llega a un punto en el que todos los átomos excitados experimentan emisión estimulada y emiten sus fotones en fase. Un máser suele contener un número muy elevado de átomos, acoplados colectivamente al campo de radiación en una gran estructura resonante. Por el contrario, los experimentos de EDC en cavidades operan con un solo átomo cada vez en una caja muy pequeña. Pero los principios de funcionamiento son los mismos.

De hecho, en 1984 físicos del Instituto Max Planck de Optica Cuántica de Garching lograron hacer funcionar un "micromáser" que contenía sólo un átomo. Para encender el micromáser, se envían átomos de Rydberg, de uno en uno, a través de una cavidad superconductora. Estos átomos se preparan en un estado cuya transición más favorable coincide con la frecuencia de resonancia de la cavidad (entre 20 y 70 gigahertz). En el micromáser de Garching todos los átomos tenían casi la misma velocidad, por lo que estaban el mismo tiempo dentro de la cavidad.

Este aparato es tan sólo otra realización del oscilador acoplado átomo-cavidad; si un átomo hubiera de permanecer indefinidamente en el interior de la cavidad, intercambiaría un fotón con la cavidad a un cierto ritmo característico. Ahora bien, y en razón de la velocidad del átomo, hay una probabilidad determinada de que un átomo salga sin cambios y una probabilidad complementaria de que deje un fotón tras de sí.

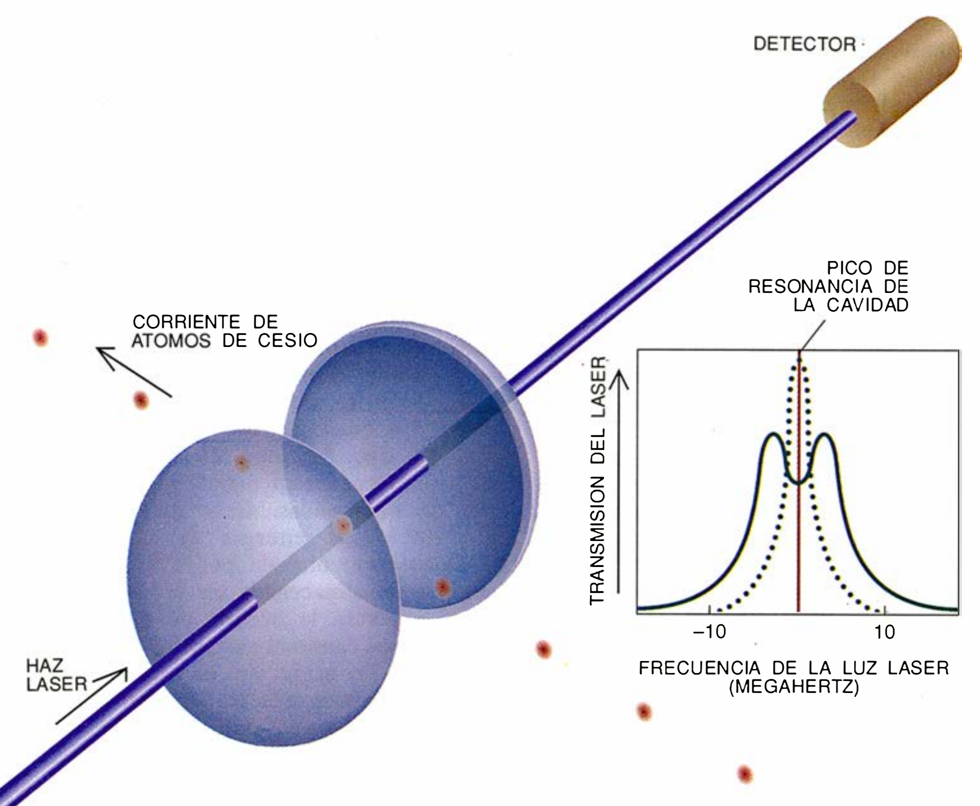
Si la cavidad permanece vacía después del primer átomo, el siguiente tendrá una probabilidad idéntica de salir de la cavidad en el mismo estado en el que entró. Con todo, un átomo acabará por depositar un fotón; entonces, el átomo que le siga encontrará muy cambiadas las probabilidades de emitir energía. El ritmo al que el átomo y el campo intercambian energía depende del número de fotones ya presentes —cuantos más fotones haya, antes se estimulará al átomo para intercambiar energía adicional con el campo—. La cavidad contendrá pronto dos fotones, con lo que aún se modificarán más las probabilidades de emisiones subsiguientes; luego habrá tres y así sucesivamente, a un ritmo que dependerá a cada paso del número de fotones ya depositados.

Ni que decir tiene que el número de fotones no aumenta sin límite a medida que los átomos atraviesan el resonador. Por no ser reflectores perfectos las paredes, a mayor número de fotones mayor probabilidad habrá de que uno de ellos sea absorbido. Andando el tiempo, esas pérdidas contrarrestarán el aumento causado por la inyección atómica.

Unos 100.000 átomos por segundo pueden pasar a través de un micromáser típico (cada uno de los cuales permanecerá en él unos 10 microsegundos); mientras, la vida media del fotón dentro de la cavidad es, en promedio, de unos 10 milisegundos. En consecuencia, un dispositivo tal que funcione de manera estacionaria contendrá unos 1000 fotones de microondas. Cada uno de ellos lleva una energía de unos 0,0001 electronvolt; así pues, la radiación total almacenada en la cavidad no superará la décima de electronvolt. Esta cantidad es mucho menor que la energía de excitación electrónica almacenada en un átomo de Rydberg, que es del orden de cuatro electronvolt.

Aunque sería difícil medir directamente un campo tan débil como éste, los átomos que atraviesan el resonador nos proporcionan una manera muy simple y elegante de controlar el máser. El ritmo de transición de un estado de Rydberg a otro depende del número de fotones en la cavidad, y los experimentadores sólo deben medir la fracción de átomos que abandonan el máser en cada estado. Las poblaciones de los dos niveles pueden determinarse ionizando los átomos en dos pequeños detectores, cada uno de los cuales consista en unas placas con un campo eléctrico entre ellas. El primer detector funcionará con un campo débil para ionizar los átomos que se hallen en el estado de mayor energía; el segundo, con un campo un poco más alto, para ionizar átomos en el estado más bajo (aquellos que han dejado detrás suyo un fotón en la cavidad).

Con su minúscula emisión de radiación y sus drásticos requerimientos de funcionamiento, el micromáser no es un aparato mecánico que podamos sacar de la estantería y poner en marcha pulsando un botón. Pero sí constituye un sistema ideal para ilustrar y poner a prueba algunos de los principios de la física cuántica. La producción de fotones en la cavidad, por ejemplo, es un fenómeno cuántico probabilístico —es, en efecto, como si cada átomo lanzase un dado para decidir si emitirá un fotón— y las medidas del funcionamiento de los micromáseres se ajustan a las predicciones teóricas.



4. LA TRANSMISION de un haz laser por una cavidad de dos espejos esféricos muy próximos se altera al paso de átomos individuales. Cuando la cavidad está vacía, la transmisión presenta un pico a una frecuencia determinada por las dimensiones de la cavidad (*curva de puntos*). Sin embargo, cuando entra un átomo que resuena con la cavidad, el átomo y la cavidad forman un sistema de osciladores acoplados. La transmisión presenta picos en dos frecuencias separadas, correspondientes a los "modos propios" del sistema átomo-cavidad. La distancia entre los picos indica la frecuencia a la que el átomo y la cavidad intercambian energía.

La fuente máser de dos fotones es una modificación curiosa del micromáser. Nuestro grupo de la ENS puso en marcha, hace cinco años, un dispositivo de ésos. Los átomos atraviesan una cavidad sintonizada a la mitad de la frecuencia de una transición entre dos niveles de Rydberg. Bajo la influencia de la radiación de la cavidad, cada átomo es estimulado a emitir un par de fotones idénticos, cada uno de los cuales lleva la mitad de la energía requerida para la transición atómica. El campo del máser se intensifica como resultado de la emisión de sucesivos pares de fotones.

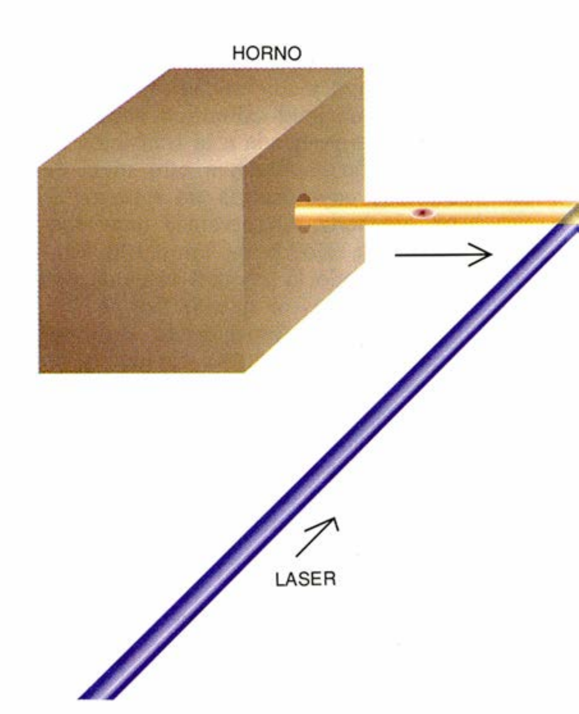
La presencia de un nivel de energía intercalado cerca del punto medio entre los niveles inicial y final de la transición facilita el proceso de dos fotones. Expuesto a grandes rasgos, un átomo va desde su nivel inicial hasta su nivel final a través de una transición "virtual" durante la cual salta al nivel intermedio emitiendo el primer fotón; desciende luego emitiendo el segundo fotón. El escalón intermedio es virtual porque la energía de los fotones emitidos, cuya frecuencia viene determinada por la cavidad, no se ajusta a las diferencias de energía entre el nivel intermedio y cualquiera de sus vecinos. ¿Cómo puede existir una situación tan paradójica? El principio de incertidumbre de Heisenberg permite al átomo tomar prestada brevemente la suficiente energía para emitir un fotón cuya energía exceda la diferencia entre el nivel alto y el medio, a condición de que el préstamo sea devuelto durante la emisión del segundo fotón.

Como en todas esas transacciones cuánticas, el plazo del préstamo de energía es muy corto. Su duración máxima es inversamente proporcional a la cantidad de energía prestada. Para un desajuste de algunas milmillonésimas de electronvolt, el préstamo dura nanosegundos. Debido a que préstamos mayores son cada vez más improbables, la probabilidad del proceso de dos fotones es inversamente proporcional al desajuste.

La cavidad micromáser posibilita el funcionamiento de dos fotones, y lo hace de dos maneras. Inhibe las transiciones de un solo fotón que no resuenan con la cavidad e intensifica la emisión de pares de fotones. Sin la cavidad, los átomos de Rydberg en el nivel superior radiarían un único fotón y saltarían al nivel intermedio. Este proceso vaciaría el nivel superior antes de que pudiera tener lugar la emisión de dos fotones.

Aunque el principio básico de un micromáser de dos fotones es el mismo que el de su pariente de un solo fotón, la forma de ponerse en marcha y de funcionar difiere bastante. Es necesaria una fuerte fluctuación, que corresponde a la improbable emisión de varios pares de fotones en rápida sucesión, para que el sistema arranque; en consecuencia, el campo sólo se desarrolla después de un tiempo de "letargo". Producida esta fluctuación, el campo en la cavidad será relativamente intenso y estimulará la emisión por subsiguientes átomos, con lo que el dispositivo alcanzará en seguida plena potencia (unos 10^{-18} watts). Un sistema de láser de dos fotones que acaba de desarrollar un grupo de la Universidad estatal de Oregón funciona de acuerdo con un esquema diferente, pero muestra esencialmente el mismo comportamiento metaestable.

El éxito de los micromáseres y de otros dispositivos similares ha movido a los investigadores de la EDC en cavidades a concebir nuevos experimentos, algunos de los cuales habrían sido descartados como propios de la más pura ciencia ficción hace sólo algunos años. De tales ex-



perimentos, anclados todavía en el terreno de las hipótesis, los más reseñables podrían ser los relacionados con la fuerzas que un átomo experimentaría en una cavidad que contuviese sólo un vacío o un débil campo constituido por algunos fotones.

El primer experimento imaginario empieza con un átomo solitario y una cavidad vacía sintonizada a una transición entre dos de los estados del átomo. Este sistema de oscilador acoplado tiene dos estados no estacionarios: uno corresponde a un átomo excitado en una cavidad vacía, el otro a un átomo desexcitado con un fotón. El sistema presenta también dos estados estacionarios obtenidos por adición o substracción de los no estacionarios —la adición de los estados no estacionarios corresponde al modo de oscilación en fase del modelo de los dos péndulos, y la substracción de los estados corresponde al modo fuera de fase—. Tales estados estacionarios difieren, por lo que a energía se refiere, en un factor igual a la constante de Planck, h, multiplicada por la frecuencia de intercambio entre el átomo y la cavidad.

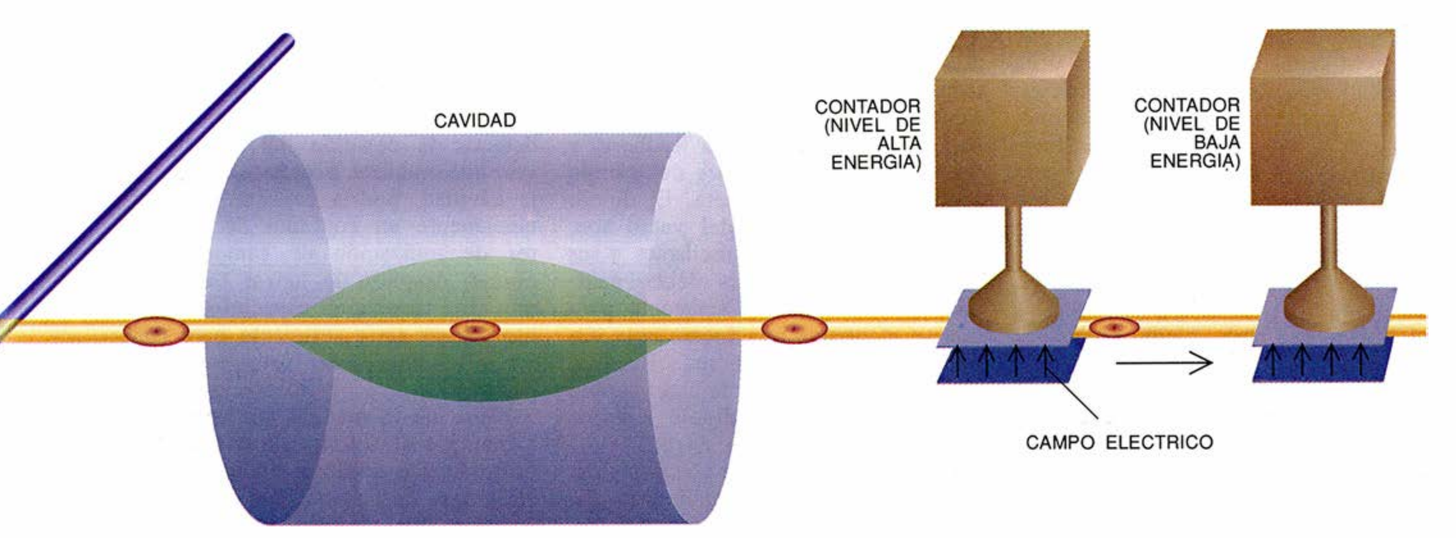
Esta frecuencia de intercambio es proporcional a la amplitud del campo del vacío resonante de la cavidad, campo que se anula en las paredes y cerca de los lugares por donde el átomo entra y sale de la cavidad. Alcanza un máximo en el centro de la cavidad. En consecuencia, el acoplamiento átomo-cavidad (y, por tanto, la diferencia de energía entre los dos estados estacionarios del sistema) es cero cuando el átomo entra y sale de la cavidad, y llega a un máximo cuando el átomo alcanza el punto medio de la misma.

Ahora bien, de acuerdo con las leyes fundamentales de la mecánica, para que un cambio en la posición relativa de dos objetos desemboque en un cambio en la energía, debe ejercerse una fuerza entre estos objetos. En otras palabras, el átomo experimenta un empujón o un tirón, si bien infinitesimal, a medida que se mueve a través de la cavidad vacía. Si el sistema está preparado en el estado de más alta energía, su energía alcanza un máximo en el centro: el átomo es repelido. Si el sistema se halla en el estado de menor energía, la interacción atrae al átomo hacia el centro de la cavidad. Estas fuerzas han sido predichas independientemente por nosotros y por un grupo de Garching y de la Universidad de Nuevo México.

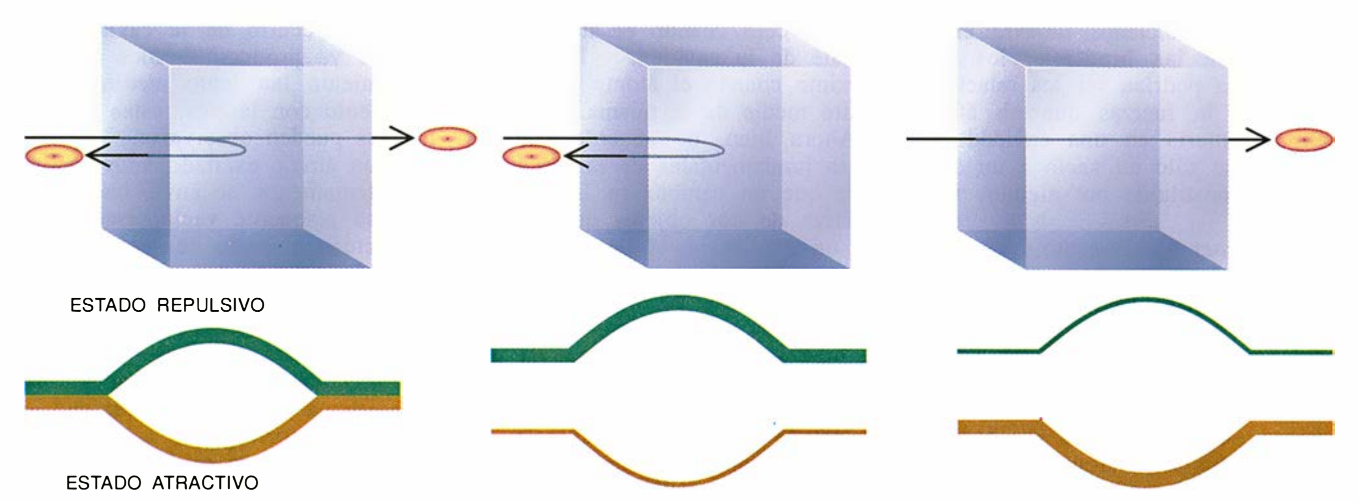
Para átomos de Rydberg en una cavidad de microondas con una frecuencia de intercambio típica de unos 100 kilohertz, la diferencia de energía potencial es de unas diez mil millonésimas de electronvolt. Esto corresponde a una temperatura de algunos microkelvins y a la energía cinética de un átomo que se mueve con una velocidad de unos pocos centímetros por segundo. Si la velocidad del átomo que entra es menor que este valor crítico, la barrera de potencial levantada por la interacción átomo-cavidad hará retroceder al átomo; si no, el pozo de potencial poseerá profundidad suficiente para atraparlo cerca del centro de la cavidad. Se pueden ya producir átomos con un movimiento tan lento mediante enfriamiento con láseres; estas fuerzas ínfimas pueden observarse.

Si un átomo excitado, moviéndose muy lentamente, se envía hacia una cavidad resonante vacía, estas fuerzas actúan a modo de separador de haz atómico. El estado inicial no estacionario del sistema consiste en la suma de los estados repulsivo y atractivo —una superposición de las dos funciones de onda estacionarias del sistema de átomo y cavidad—. Una mitad corresponde a un átomo reflejado al entrar en la cavidad; la otra, a un átomo que la atraviesa. Cada posibilidad ocurre con la misma probabilidad.

Para preparar un estado de sólo atracción o de sólo repulsión, la cavidad debe ser desintonizada ligeramente de la transición atómica. Cuando la transición es un poco más energética que el fotón que la cavidad puede soportar, el estado con un átomo excitado y sin fotón tiene algo más de energía que el estado con un átomo desexcitado y un fotón. Cuando el átomo entra en la cavidad, el acoplamiento de intercambio insta la separación de los dos estados, a fin de que el estado con un átomo excitado y sin fotón conecte de manera inequívoca con el estado estacionario de mayor energía, en el que el átomo es repelido. Esta misma treta, con la misma sencillez, proporcionará un estado atractivo si la energía del fotón de la cavidad es ligeramente superior a la transición atómica.



5. EL MICROMASER UTILIZA UN HAZ ATÓMICO y una cavidad superconductora para producir radiación coherente de microondas. Un haz láser (*izquierda*) lanza átomos procedentes de un horno y los excita a estados de Rydberg de alta energía. Los átomos atraviesan uno a uno una cavidad sintonizada a la frecuencia de transición hacia algún estado de más baja energía; el campo se desarrolla a medida que átomos sucesivos interaccionan con la cavidad y depositan fotones en ella. El campo del micromáser puede deducirse de las lecturas de los contadores que controlan el número de átomos que abandonan la cavidad, sea en el estado de alta energía o en el de baja energía.



6. UNA CAVIDAD VACIA puede repeler o atraer átomos excitados que se muevan con lentitud. La intensidad del acoplamiento entre un átomo y una cavidad sintonizada suele anularse en las paredes y alcanza un máximo en el centro. (Las curvas de la parte inferior muestran la energía del sistema átomo-cavidad como función de la posición del átomo dentro de la cavidad.) El cambio energético da lugar a una fuerza sobre los átomos que se mueven a través de la cavidad. Si la longitud de onda de la cavidad coincide exactamente con la transición atómica, esta fuerza puede ser tanto atractiva como repulsiva (*izquierda*). Si la transición atómica tiene una frecuencia ligeramente mayor que la frecuencia de resonancia de la cavidad, la fuerza será repulsiva (*centro*); si la transición tiene una frecuencia más baja, la fuerza será atractiva (*derecha*).

Se funda esta evolución del sistema átomo-cavidad en el teorema adiabático, que dice que, si el ritmo de cambio de un sistema cuántico es lento, el sistema persistirá en el estado en que se dispuso inicialmente, siempre que la energía de dicho estado no coincida en ningún momento con la de otro estado. Los átomos muy lentos que consideramos aquí cumplen, sin duda, las condiciones adiabáticas.

Estas fuerzas átomo-cavidad persistirán mientras el átomo permanezca en el estado de Rydberg y las paredes de la cavidad no absorban el fotón. Semejante estado de cosas dura una fracción de segundo, lo suficiente para que el átomo cruce una cavidad del tamaño de un centímetro.

Las fuerzas entre el átomo y la cavidad son, en verdad, extrañas, fantasmales. La cavidad, al principio, está vacía; en consecuencia, la fuerza surge del campo del vacío, como si se obtuviese de la nada. Por descontado, esto no es estrictamente cierto, porque si la cavidad está vacía, el átomo habrá de encontrarse, de partida, en un estado excitado, y, al fin y al cabo, algún precio se paga.

La fuerza puede también atribuirse al intercambio de un fotón entre el átomo y la cavidad, análogamente a como se atribuyen las fuerzas eléctricas entre dos partículas cargadas al intercambio de fotones o las fuerzas entre dos átomos de una molécula al intercambio de electrones.

Otra interpretación de la atracción y repulsión del vacío en el sistema de átomo y cavidad, basada en un análisis microscópico, muestra que estos fenómenos no difieren, en esencia, de las fuerzas electrostáticas que en la corte francesa del siglo XVIII servían de juego de sociedad. Si se carga una aguja y se le acercan pequeños trozos de papel, éstos se pegarán al metal. El intenso campo eléctrico en la punta polariza los trozos: atrae los electrones hacia un lado y deja una carga positiva neta en el otro: se crean pequeños dipolos eléctricos. La atracción entre la aguja y las cargas del lado del papel cercano a ella supera la repulsión entre la aguja y las cargas del lado distante, con lo que se genera una fuerza atractiva neta.

El átomo y la cavidad contienen los mismos ingredientes, aunque a nivel cuántico. El campo del vacío limitado por las paredes de la cavidad polariza el átomo de Rydberg, y las variaciones espaciales del campo producen una fuerza neta. El dipolo atómico y el campo del vacío son, sin embargo, cantidades oscilantes, y sus respectivas oscilaciones deben guardar una fase relativa constante para que se mantenga una fuerza neta durante el tiempo que sea. Resulta, pues, que el proceso de intercambio del fotón conecta el dipolo atómico y las fluctuaciones del vacío.

La debilísima fuerza experimentada por el átomo se incrementa añadiendo fotones a la cavidad. La frecuencia de intercambio entre el átomo y la cavidad aumenta con la intensidad del campo; y así, cada fotón añade un cuanto discreto de altura a la barrera de potencial en el estado de repulsión y un cuanto discreto de profundidad al pozo de potencial en el estado atractivo. En razón de ello, debería ser posible deducir el número de fotones que hay en el interior de la cavidad midiendo el tiempo que un átomo con una velocidad conocida tarda en cruzarla o, equivalentemente, detectando la posición del átomo a lo largo de la cavidad en un instante dado.

Se podrían inyectar quizás una docena de fotones en una cavidad, y lanzar después a través de ésta, de uno en uno, átomos de Rydberg cuya velocidad fuese aproximadamente de un metro por segundo. La energía cinética de estos átomos sería mayor que la energía potencial del átomo-cavidad, y atravesarían la cavidad con un ligero retraso o adelanto, según el signo de la desintonización entre la cavidad y el átomo. Para detectar la posición del átomo una vez que hubiese pasado a través de la cavidad, podría conectarse simultáneamente un conjunto de detectores de ionización de campo algún tiempo después de lanzar cada átomo. Una resolución espacial de algunas micras sería suficiente para contar el número de fotones de la cavidad.

Antes de la medida, por supuesto, el número de fotones no es sólo una cantidad que desde el punto de vista clásico se desconoce; por lo general, encierra además una incertidumbre cuántica inherente. La cavidad suele contener un campo; su descripción es una función de onda cuántica que asigna una amplitud compleja a cada posible número de fotones, y la

probabilidad de que la cavidad almacene un número dado de fotones es el cuadrado del módulo de la correspondiente amplitud compleja.

De acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica, la acción del detector que registra la posición de un átomo tras cruzar la cavidad colapsa la ambigua función de onda del número de fotones y le da a éste un valor determinado. Cualquier átomo posterior utilizado para medir este número registrará el mismo valor. Si el experimento se repite a partir de cero varias veces, con el mismo campo inicial en la cavidad, la distribución estadística de fotones vendrá dada por el conjunto de las mediciones tomadas. Sin embargo, en cualquier serie de mediciones, el número de fotones permanecerá constante una vez determinado.

Este método de medir el número de fotones en la cavidad realiza la hazaña observacional que recibe el nombre de no demolición cuántica. La técnica, además de determinar perfectamente el número de fotones en la cavidad, lo deja inalterado para posteriores lecturas.

Aunque esta característica no parezca ser otra cosa que una condición que se le pediría a cualquier medida, es imposible conseguirla por métodos convencionales. La manera normal de medir este campo es la de acoplar la cavidad a algún tipo de fotodetector, que transforma los fotones en electrones y los cuenta. La absorción de fotones es también un fenómeno cuántico, regido por el azar; por tanto, el detector añade su propio ruido a la intensidad medida. Además, cada medición requiere la absorción de fotones, y el campo pierde energía irreversiblemente. En consecuencia, repetir este procedimiento da como resultado una lectura diferente, más baja cada vez. En el experimento sin demolición, los átomos ligeramente no resonantes interaccionan con el campo de la cavidad sin intercambio permanente de energía.

Grupos de óptica cuántica de todo el mundo llevan varios años estudiando distintas versiones de experimentos de no demolición cuántica, y han empezado ya a hacerla realidad. La medición directa del retraso o adelanto de un átomo, que no entraña ninguna dificultad conceptual, peca de imprecisión. Variantes más prometedoras se basan en efectos de interferencia de los átomos que atraviesan la cavidad. Al igual que los fotones, los átomos pueden comportarse como ondas; pueden incluso interferir consigo mismos. La longitud de onda de De Broglie de un átomo es inversamente proporcional a su velocidad; un átomo de rubidio que viaje a 100 metros por segundo, por ejemplo, tendrá una longitud de onda de 0,45 angstroms.

Si un átomo es frenado mientras atraviesa la cavidad, su fase se desplazará en un ángulo proporcional al retraso. Un retraso que retarde un átomo en sólo 0,22 angstroms, la mitad de una longitud de onda de De Broglie, reemplazará una cresta de la onda de materia por un valle. Este desplazamiento se detecta fácilmente por interferometría atómica.

Si se prepara el propio átomo en una superposición de dos estados, uno de los cuales sea retardado por la cavidad mientras que el otro quede sin afectar, entonces el propio paquete de ondas atómico se separará en dos partes. Cuando estas dos partes interfieran entre sí, la señal resultante proporcionará una medida del desplazamiento de fase de la onda de materia y, por tanto, del número de fotones en la cavidad. Precisamente este experimento se está llevando a cabo en nuestro laboratorio de París; se usan para ello átomos de Rydberg acoplados a una cavidad superconductora en un interferómetro de Ramsey.

Se trata de un aparato con múltiples aplicaciones potenciales. Como los átomos que pasan por una cavidad pueden contar el número de fotones sin perturbarlo, daremos fe de la muerte natural de los fotones en tiempo real. Si un fotón desaparece en las paredes de la cavidad, la ausencia se registrará inmediatamente en la figura de interferencia atómica. Tales experimentos deberían proporcionar más pruebas de la teoría cuántica y quizás abran el camino a una nueva generación de sensores en los dominios óptico y de microondas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CAVITY QUANTUM ELECTRODYNAMICS. E. A. Hinds en *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics,* vol. 28. págs. 237-289, 1991.

CAVITY QUANTUM OPTICS AND THE QUANTUM MEASUREMENT PROCESS. P. Meystre en *Progress in Optics*, vol. 30. Dirigido por E. Wolf. Elsevier Science Publishers, 1992.

CAVITY QUANTUM ELECTRODYNAMICS. S. Haroche en *Fundamental systems in Quantum Optics*. Actas de Les Houches Summer School, Sesión LIII. Dirigido por J. Dalibard, J.-M. Raimond y J. Zinn-Justin. North-Holland, 1992.

Catálisis en superficies

Pueden observarse ya las interacciones de sólidos y moléculas que producen la aceleración de reacciones químicas. Los conocimientos sobre catalizadores así obtenidos tienen muy variadas aplicaciones

Cynthia M. Friend

La química de superficies es una actividad reciente. Hace unos 15 años, sólo empezaba a despuntar como rama de la ciencia. Pocos eran por entonces los métodos de análisis de las complejas reacciones de superficie. En los últimos años he visto a esta nueva disciplina avanzar rápidamente a medida que se creaban nuevas técnicas concebidas para la obtención de precisas imágenes de las reacciones de superficie. Ahora, con la mediación de estos instrumentos, podemos observar la acción de los catalizadores a nivel molecular. Me centraré en tres casos sencillos, aunque de largo alcance científico, técnico y social, que ilustran el avance del conocimiento de las reacciones catalíticas instado por la química de superficies: la síntesis del amoníaco, la rotura del óxido nítrico y la desulfuración de los combustibles fósiles.

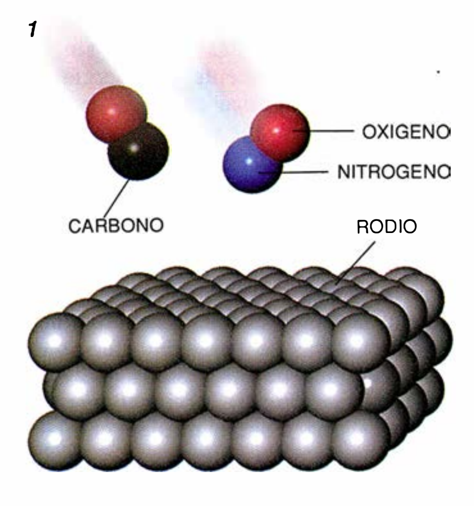
En 1909, el químico alemán Fritz Haber encontró una forma rentable de síntesis de amoníaco a partir de los gases nitrógeno e hidrógeno. Cinco años después, la compañía Badische Anilin- & Soda-Fabrik (BASF) iniciaba su producción industrial, para ruina y bendición de la humanidad. El proceso Haber proporcionó a Alemania la materia prima para la fabricación de explosivos (nitroglicerina). Hasta entonces los preparaba a partir del salitre chileno. Si se hubiera bloqueado el suministro y el proceso Haber no se hubiese inventado, la primera guerra mundial, según algunos historiadores, podría haber sido más corta. Pero el proceso Haber también revolucionó la agricultura, al facilitar la producción en masa de fertilizantes baratos.

Para su producción eficiente de amoníaco, Haber añadía hierro como catalizador a una mezcla de los gases nitrógeno e hidrógeno, tras lo que sometía el reactor a presiones de unas 100 atmósferas y temperaturas en torno a los 500 grados Celsius. Mientras el nitrógeno y el hidrógeno circulaban sobre el catalizador, el amoníaco se condensaba a partir de la mezcla. La contribución más importante de Haber fue el descubrimiento de un buen catalizador de la síntesis de amoníaco. Probó más de mil materiales antes de decidirse por el hierro. Hoy se usa un catalizador de hierro, potasio y calcio, que actúan mejor que el hierro solo.

El hierro, como todos los catalizadores, aumenta la proporción en que ocurre una reacción deseada —la síntesis del amoníaco, en este caso— al tiempo que restringe las probabilidades de las reacciones indeseadas —por ejemplo, la recombinación de átomos de nitrógeno para formar nitrógeno gaseoso—. La acción catalítica tiene lugar cuando las moléculas reaccionantes se ligan por un tiempo a la superficie del sólido. Estas uniones alteran la fuerzas entre átomos, y por esa razón los requerimientos energéticos de la reacción cambian; de ahí que, en presencia de un catalizador, se primen unos procesos y otros no. Los catalizadores ni se consumen ni se producen durante la reacción.

Pasaron décadas antes de que se comprendiese el comportamiento del hierro como catalizador molecular. La química de superficies ha confirmado que la función primaria del catalizador es facilitar la disociación del gas nitrógeno (N_2). El enlace que mantiene unida la molécula de N_2 es muy fuerte, y, por tanto, no se rompe a no ser que la molécula posea una considerable cantidad de energía (941.000 joules por mol de nitrógeno). A medida que el contenido de energía de una molécula de N_2 aumenta, crece la distancia promedio entre los átomos de nitrógeno. Es como escalar una montaña: si hay que quemar calorías para alcanzar la cima, la molécula de N_2 deberá contener energía para superar una barrera de alta energía; y así como un montañero que camine más deprisa alcanzará antes la cima, una molécula que tenga mucha energía superará más fácilmente la barrera (el número de moléculas de alta energía en un

CYNTHIA M. FRIEND es profesora de química en la Universidad de Harvard. Doctora en química por la de California en Berkeley (1981), ha sido galardonada con la medalla Garvin de la Sociedad Química Americana y el Premio Presidencial para Jóvenes Investigadores. Es pionera de la aplicación de la química de superficies a la catálisis.



1. SE USA EL CATALIZADOR de rodio en los sistemas de escape de los automóviles para facilitar la transformación del óxido nítrico (NO) y el monóxido de carbono (CO) en gases menos perjudiciales. Las herramientas de la química de superficies permitieron que se comprendiese, en 1986, el comportamiento molecular de dicho catalizador. El monóxido de carbono (*1*) se enlaza con la superficie de rodio (*2*). Cuando el óxido nítrico hace lo mismo, se disocia en oxígeno y nitrógeno (*3*). El oxígeno enlazado reacciona con el CO para formar CO_2 (*4*). Si otros CO y NO se aproximan al nitrógeno enlazado restante (5-8), el catalizador de rodio promueve la formación de una segunda molécula de dióxido de carbono y una de nitrógeno molecular (N_2).

gas aumenta en proporción con la temperatura).

La proporción en que el N_2 se disocia depende de la proporción de moléculas que puedan superar la barrera, y ambas proporciones están relacionadas, a su vez, con la energía de que disponen —la temperatura— las moléculas. No obstante, para que el amoníaco se forme no basta con que las moléculas de nitrógeno e hidrógeno se calienten hasta sus puntos de disociación: a esas temperaturas, el mismo amoníaco se rompe tan deprisa como se forma.

Sin embargo, si las moléculas de nitrógeno interaccionan con átomos de hierro en una superficie, se disociarán a temperaturas bastante bajas. El hierro cataliza la disociación del N_2; dicho de otro modo, disminuye la barrera energética de forma que los dos átomos de nitrógeno se separen fácilmente. Los átomos de hierro llevan esto a cabo por cesión de electrones a la molécula de nitrógeno. Como resultado, los átomos de hierro establecen un enlace químico con la molécula de nitrógeno, y, de forma recíproca, el enlace entre los átomos de nitrógeno en la molécula se debilita. Un enlace nitrógeno-nitrógeno débil corresponde a una barrera de energía baja y facilita la disociación del N_2. Este es un proceso de catálisis típico.

En 1984 Gerhard Ertl, Michael Grunze y Min-Chi Tsai con sus colaboradores, entonces en la Universidad de Munich, obtuvieron la primera prueba directa del debilitamiento del enlace nitrógeno-nitrógeno. Examinaron muestras de monocristales de hierro en condiciones de vacío —es decir, en un ambiente libre de gases extraños—. A diferencia de los átomos de las partículas de hierro ordinarias, los de los monocristales forman una red ordenada. Puesto que algunas reacciones químicas son muy sensibles a la distribución de átomos de la superficie, el uso de monocristales permite el estudio metódico de estos efectos. Hasta se puede variar la distribución superficial cortando cristales por distintos ángulos.

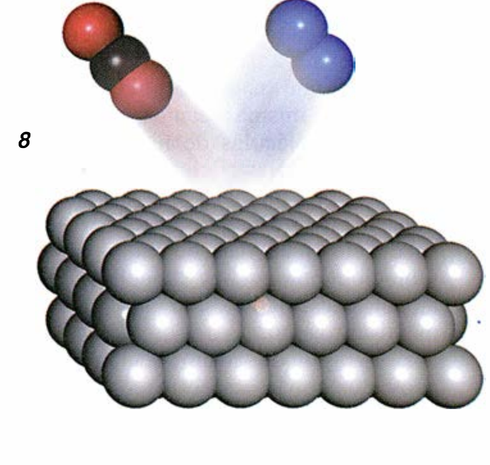
Para observar las reacciones, el grupo de Munich usó dos herramientas importantes en química de superficies: la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X y la espectroscopía de alta resolución de pérdida de energía electrónica (ARPEE), que, al sondear las fuerzas entre los átomos, nos dejan "ver" los cambios producidos cuando una molécula interacciona con la superficie.

La espectroscopía fotoelectrónica de rayos X, desarrollada a principios de los sesenta, permite medir la energía de los electrones fuertemente enlazados de las moléculas. En este método, los rayos X golpean la muestra experimental y hacen saltar electrones de los átomos de la superficie y de cualquier molécula enlazada con ella. La energía de esos electrones es sensible al entorno químico local; así, la técnica fotoelectrónica da información sobre las fuerzas de enlace (por ejemplo, la rotura del enlace nitrógeno-nitrógeno en N_2).

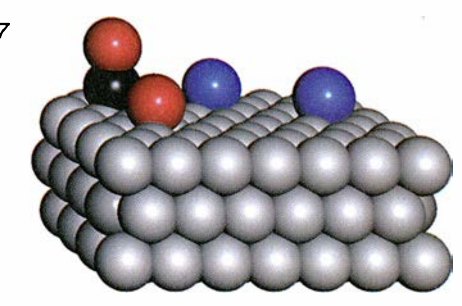
La espectroscopía ARPEE, inventada a finales de los setenta y perfeccionada a mediados de los ochenta, mide las energías vibracionales moleculares para conocer la fuerzas entre átomos en las moléculas. Los átomos de una molécula pueden representarse por medio de bolas unidas entre sí por gomas elásticas. Las gomas elásticas representan los enlaces químicos; las bolas son los núcleos atómicos. La fuerza del enlace está relacionada con la flexibilidad o rigidez de la goma elástica; depende, pues, de la energía necesaria para separar los átomos o cambiar el ángulo relativo del enlace.

Es bastante directa la interpretación de los resultados de la espectroscopía ARPEE en el caso de una molécula de nitrógeno. La molécula de nitrógeno sólo puede vibrar por expansión y compresión del enlace nitrógeno-nitrógeno; una molécula de nitrógeno tiene un modo monovibracional, por usar la jerga de la química. Si bombardeamos una molécula de nitrógeno con electrones, vibrará, y les absorberá una cantidad característica de energía. La detec-

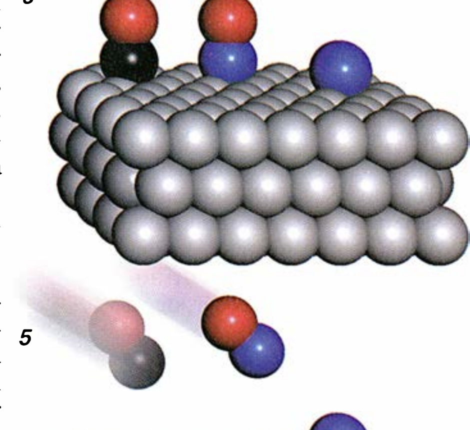
8



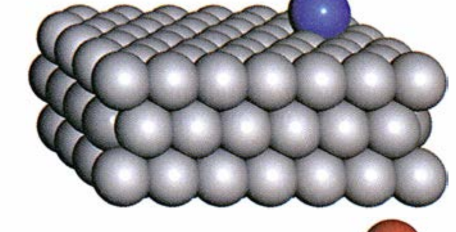
7



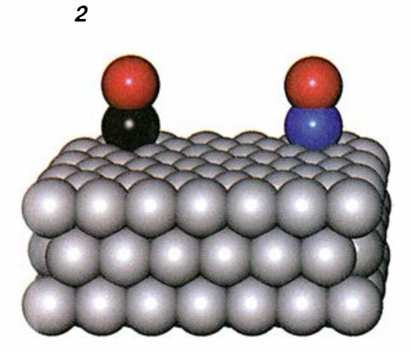
6



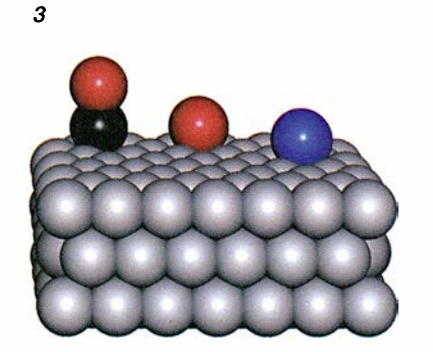
5



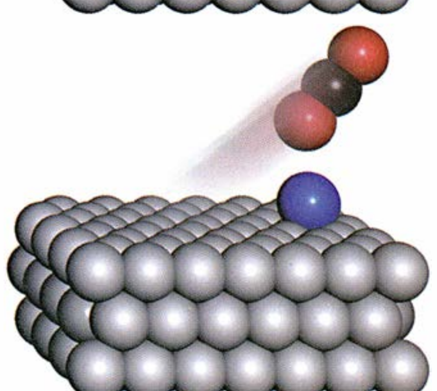
2



3



4



ción de tales electrones nos permite deducir la energía de las vibraciones y, con ella, la fuerza del "muelle", el enlace, que mantiene unida la molécula. La misma técnica se puede aplicar a moléculas de nitrógeno enlazadas a la superficie, pero los resultados son un poco más complicados. Una molécula unida a una superficie tiene más de un modo de vibración porque hay "muelles" adicionales asociados con los enlaces metal-nitrógeno.

El grupo de Munich demostró, apoyado en la espectroscopía ARPEE, que, cuando una molécula de N_2 se absorbe en una superficie de hierro, la energía requerida para separar los átomos de nitrógeno disminuye espectacularmente en comparación con la energía necesaria para estirar el enlace de una molécula de nitrógeno que flota libre.

Además de debilitar el enlace nitrógeno-nitrógeno, el hierro, como han demostrado las técnicas de química de superficies, realiza otras dos funciones en la síntesis del amoníaco. Primero, cuando las moléculas de hidrógeno (H_2) interaccionan con la superficie de hierro, el enlace hidrógeno-hidrógeno se debilita; así, se liberan con facilidad los átomos de hidrógeno y se enlazan con la superficie. Segundo, los átomos de hierro confinan los átomos de nitrógeno e hidrógeno en la superficie de tal modo que puedan reaccionar y formar NH, NH_2 y, por último, NH_3, amoníaco, el producto deseado.

La probabilidad de que se forme un enlace entre los átomos de nitrógeno e hidrógeno depende de hasta qué punto el nitrógeno se une al hierro. El enlace hierro-nitrógeno, suficientemente fuerte para que el nitrógeno no se recombine ni forme N_2, es lo suficientemente débil para que se pueda combinar con el hidrógeno. Algunos metales disocian mejor que el hierro las moléculas de nitrógeno en sus átomos, pero el enlace con el metal es tan fuerte que no se combinan luego con el hidrógeno para formar amoníaco. Se trata de datos que ayudan a revelar por qué un catalizador es superior a otro y qué catalizador mejorará la síntesis comercial del amoníaco y sacará mayor rendimiento de los procesos industriales anejos.

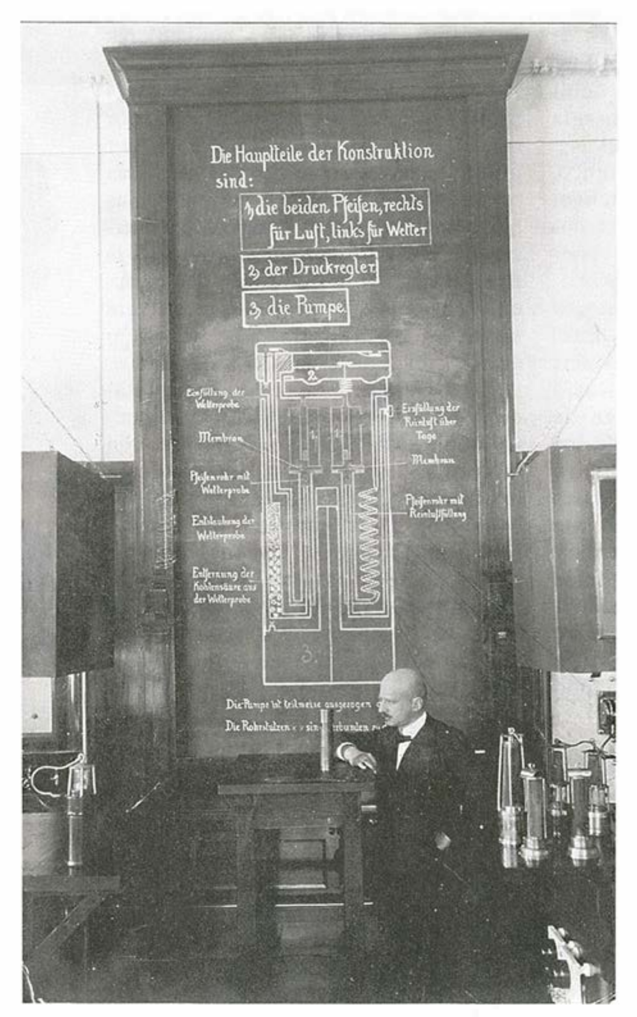
Cuando se aplican los resultados de los estudios de superficie a los catalizadores comerciales, se presentan problemas difíciles. Las herramientas de la química de superficies requieren condiciones de vacío, mientras que la mayoría de los catalizadores trabaja a altas presiones.

Los químicos de superficies tienen un criterio de limpieza extremo. Según sus normas, la superficie de una muestra debe mantenerse limpia de contaminantes durante al menos unas horas; ha de permanecer, en condiciones de ultravacío: a presiones 10 billones de veces menores que la atmosférica. Estas presiones ínfimas permiten el estudio de superficies de composiciones conocidas e introducir reactivos con un propósito determinado. Nunca podría hacerse tal cosa, digamos, al aire libre, pues una superficie de metal perfectamente limpia se cubriría con moléculas de gas en una milmillonésima de segundo. Aun cuando la presión se redujera a una milmillonésima de la atmosférica, la superficie se cubriría en un segundo, más o menos, tiempo insuficiente para realizar cualquier experimento.

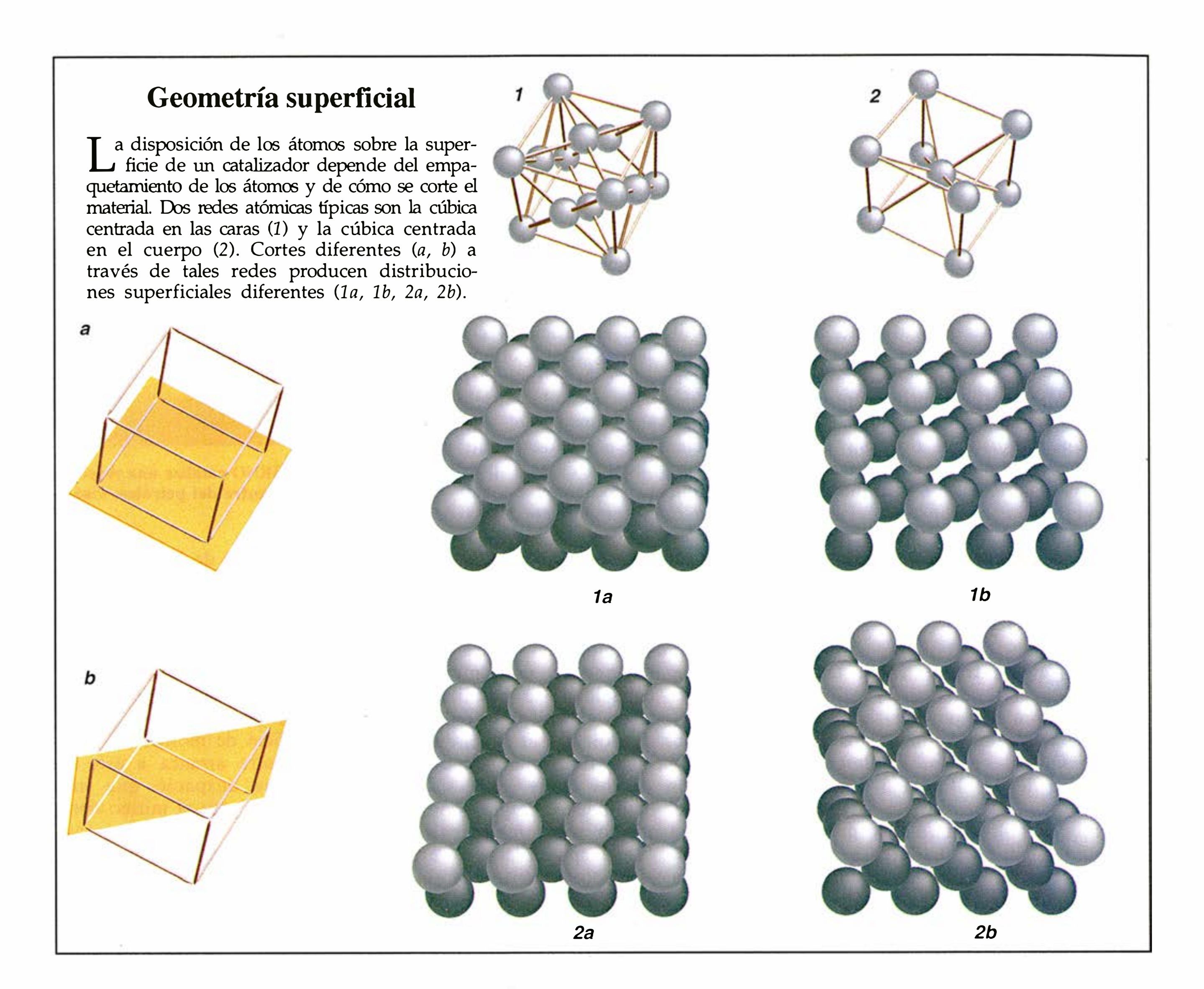
Se ha de andar con tiento a la hora de aplicar los descubrimientos de la química de superficies a las reacciones catalíticas de alta presión. La disparidad de las presiones implica una diferencia enorme en el número de moléculas gaseosas que chocan contra el catalizador en cualquier instante, y, por tanto, la cinética de la reacción en el laboratorio puede diferir de la dinámica de la reacción a alta presión. Se ignoraba en un principio cómo salvar este "salto (*gap*) de presión" —así lo llamaban—; pero los estudios de superficie en condiciones ideales nos han enseñado ya a extrapolar el comportamiento de las reacciones catalíticas a presiones altas.

La historia de una serie de experimentos de química de superficies diseñados para perfeccionar los convertidores catalíticos de los automóviles proporciona un elegante ejemplo de cómo sortear el salto de presión. Los convertidores deben eliminar el óxido nítrico (NO) y el monóxido de carbono (CO) de las emisiones del automóvil. El óxido nítrico reacciona rápidamente con el aire y forma compuestos de nitrógeno-oxígeno (NO_x), perjudiciales para el ambiente al desencadenar la lluvia ácida. El monóxido de carbono también es tóxico para casi todas las formas de vida. Al transformar el NO y el CO de los tubos de escape en productos menos dañinos, los catalizadores han reducido mucho los niveles de estos contaminantes. Pese al éxito de esta técnica, se continúa investigando en pos de mejores catalizadores: pequeñas mejoras pueden traer grandes beneficios para el entorno.

Un convertidor catalítico típico consta de partículas de platino (Pt) y rodio (Rh) depositadas en un panal cerámico. Las partículas de Pt y Rh catalizan las reacciones que eliminan del tubo de escape los NO_x, CO e hidrocarburos que no se queman. El panal cerámico y el tamaño limitado de las partículas cumplen dos funciones: maximizar la exposición de los



2. FRITZ HABER desarrolló, en 1909, el primer proceso comercial de síntesis del amoníaco. Descubrió que el hierro cataliza la reacción que transforma los gases hidrógeno y nitrógeno en amoníaco.



Geometría superficial

La disposición de los átomos sobre la superficie de un catalizador depende del empaquetamiento de los átomos y de cómo se corte el material. Dos redes atómicas típicas son la cúbica centrada en las caras (*1*) y la cúbica centrada en el cuerpo (*2*). Cortes diferentes (*a, b*) a través de tales redes producen distribuciones superficiales diferentes (*1a, 1b, 2a, 2b*).

metales a los humos residuales y minimizar la cantidad de platino y rodio —dos metales muy caros—.

A mediados de los ochenta, la General Motors (GM) empezó a investigar la interacción del rodio con el óxido nítrico y el monóxido de carbono de los tubos de escape. Se estudiaron reacciones de NO y CO en monocristales de rodio. Mediante espectroscopía ARPEE, junto a otros métodos, se identificaron los pasos claves de la ruptura del óxido nítrico y se determinó la influencia de la disposición de los átomos de rodio de la superficie en la catálisis.

Pero no estaba claro si estos resultados eran aplicables a los convertidores catalíticos: los experimentos se realizaron en condiciones de vacío, mientras que las partículas de rodio usadas en los convertidores catalíticos están expuestas a gases a alta presión. Para demostrar que se podía obtener información práctica de los estudios de química de superficies, la GM midió la tasa de eliminación de NO sobre una superficie de rodio en un ambiente que reproducía las condiciones de presión de un convertidor catalítico. A partir del análisis de la acción del rodio en condiciones de vacío y a presiones elevadas, los expertos diseñaron modelos matemáticos del proceso catalítico. El modelo ha permitido que los resultados de los estudios de superficie se usen para determinar la respuesta de nuevos tipos de materiales catalíticos a presiones elevadas.

El grupo de la GM halló también que la disociación del NO era sensible a la disposición de los átomos en la superficie de rodio. A esta conclusión llegaron mediante la espectroscopía infrarroja. Esta técnica es similar a la espectroscopía ARPEE, pero en vez de electrones utiliza radiación infrarroja a fin de causar vibraciones moleculares. La espectroscopía infrarroja tiene la ventaja de que puede utilizarse tanto en condiciones de vacío como de altas presiones. Por tanto, la GM pudo abordar, a altas y bajas presiones, la interacción del óxido nítrico con partículas irregulares de rodio, así como su enlace con una superficie de rodio, donde los átomos están distribuidos según un patrón hexagonal. La espectroscopía infrarroja capta diferencias en la vibración del NO en los dos tipos de superficie, con lo que se demuestra que la estructura superficial influye en el enlace y, en último término, en el proceso catalítico.

El microscopio de efecto túnel de barrido se emplea desde hace poco en la investigación, con un detalle aún mayor, de cómo la estructura superficial afecta a la disociación del óxido nítrico en rodio. En 1986 Gerd K. Binnig y Heinrich Rohrer ganaron el premio Nobel por haber inventado ese aparato, que ha revolucionado el estudio de la estructura superficial. Produce imágenes a escala atómica de una superficie por medio de una fina aguja de metal de sólo unos angstroms que coloca so-

bre la muestra y que mueve luego por la superficie. El microscopio detecta los electrones a medida que pasan entre la superficie y la aguja. Puesto que el flujo de electrones está relacionado con la altura de los átomos en la superficie, la información puede traducirse en imágenes.

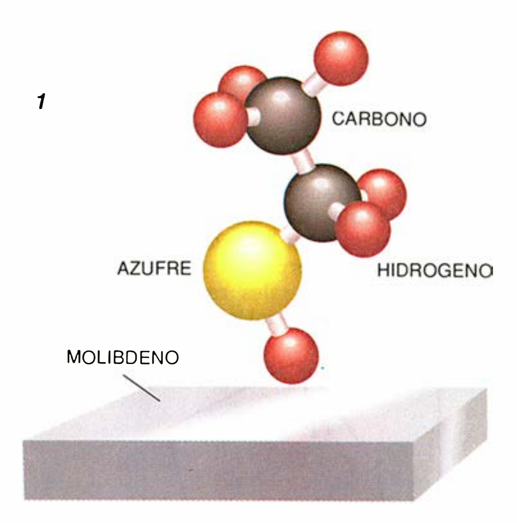
La química de superficies ha servido para que los investigadores entiendan los procesos catalíticos con los que se extrae el azufre de los combustibles fósiles. Las trazas de azufre en éstos perjudican el entorno de dos maneras. En primer lugar, cuando el combustible se quema en un motor, parte del azufre que contiene reacciona con el aire y forma óxidos de azufre, lo que contribuye a la lluvia ácida; en segundo, el azufre se introduce entre el rodio y el platino que forman los convertidores catalíticos, con lo que aminora su actividad y aumenta indirectamente la emisión de NO y CO.

El azufre se extrae en las instalaciones petroquímicas y refinerías al mismo tiempo que se transforma el crudo en hidrocarburos tan útiles como el octano. Idealmente, el proceso de desulfuración debería extraer todo el azufre sin destruir los valiosos hidrocarburos. El proceso requiere por consiguiente una catálisis que estimule la desulfuración e inhiba la ruptura de los hidrocarburos puros. El mejor catalizador para desulfurizar es una mezcla de molibdeno, cobalto y el propio azufre. Puesto que el material presenta una estructura muy complicada, cuesta el desentrañar la interacción de los productos petroquímicos con el catalizador. No está clara la intervención eficaz de todos los componentes del catalizador en la desulfuración; del sulfuro de cobalto se sospecha que no sea un material catalíticamente activo.

En la Universidad de Harvard hemos investigado el papel que el molibdeno desempeña en la desulfuración, centrando nuestro interés en la interacción entre los productos petroquímicos y el molibdeno en sus diversas formas y en combinación con cobalto y azufre. Nos proponemos construir un modelo general que sirva para predecir los productos y porcentajes de reacción de todos los hidrocarburos comunes que contienen azufre.

Mi grupo lleva ocho años dedicado a ese empeño y el modelo resultante describe cómo los tioles, el principal tipo de compuesto de azufre contenido en los productos petroquímicos, interaccionan con varias clases de superficies de molibdeno. Los tioles constan de un átomo de hidrógeno unido a otro de azufre que, a su vez, se enlaza a cualquier combinación de carbono e hidrógeno. Para estudiar la interacción entre tioles y catalizadores de molibdeno, utilizamos cristales de molibdeno puro tales que sus átomos superficiales constituyesen un sistema muy ordenado. La regularidad de la estructura limita el número de tipos de posiciones disponibles para formar el enlace. Introduciendo sistemáticamente diversos componentes en la superficie de molibdeno, podíamos deducir el papel de cada componente en la desulfuración.

Hace muchos años se produjo un asombroso descubrimiento sobre la desulfuración inducida por molibdeno. La acción del molibdeno puro mejora cuando se contamina con azufre; la mayoría de los metales, en cambio, pierden la capacidad de catalizar reacciones cuando el azufre se enlaza con ellos. Estudiamos el papel del azufre en la superficie comparando la reacción de los tioles sobre superficies de molibdeno limpias con su comportamiento sobre molibdeno cubierto por una capa ordenada de azufre. Los tioles interaccionan con el catalizador de molibdeno y producen hidrocarburos, hidrógeno, carbono superficial y azufre. Por ejemplo, el etanotiol ($CH_3(CH_2)SH$) se descompo-

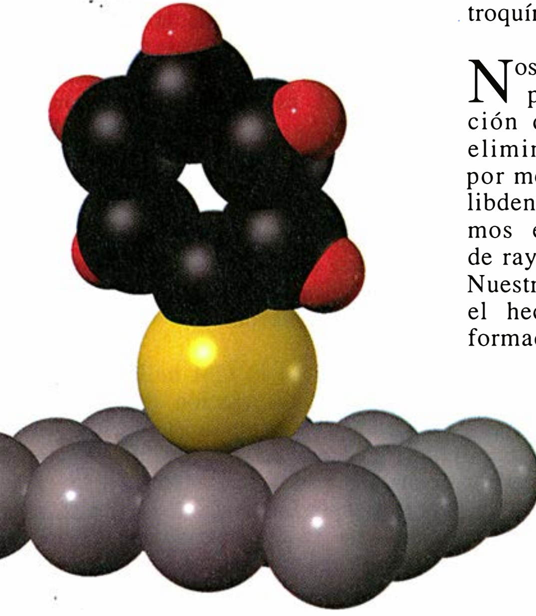


4. EL MOLIBDENO cataliza una reacción que elimina el azufre del petróleo. Cuan-

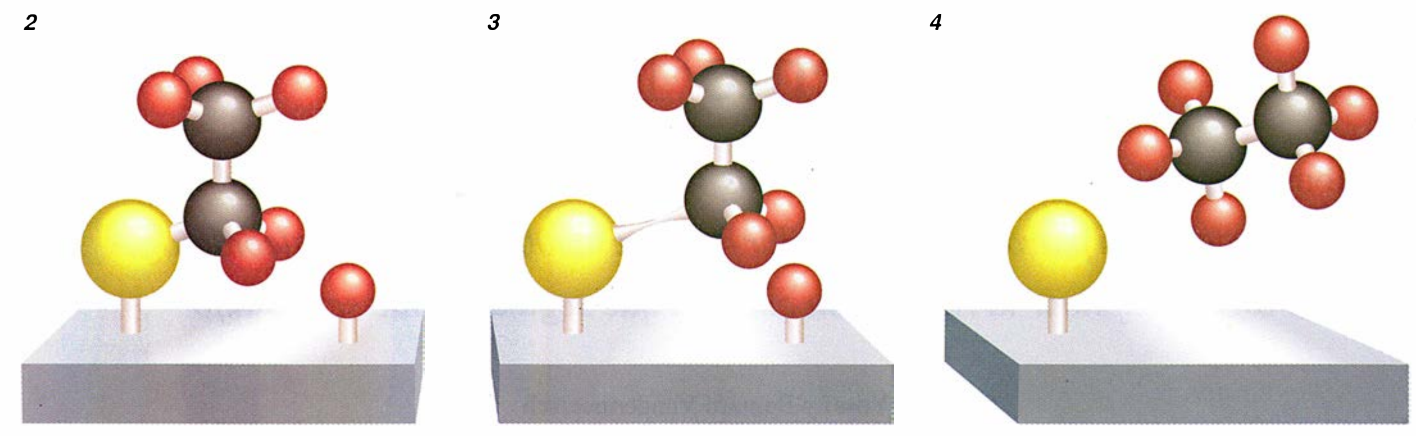
ne en azufre y uno de los dos hidrocarburos siguientes: etano (CH_3CH_3) y eteno (CH_2CH_2). En principio, el catalizador debería promover sólo la producción de hidrocarburos y la eliminación del azufre; debería inhibir la síntesis de carbono superficial e hidrógeno, de poco valor.

Una superficie de molibdeno recubierta con azufre arranca a éste de los tioles más despacio que una superficie limpia, pero al mismo tiempo el azufre que hay sobre la superficie de molibdeno disminuye la proporción de reacciones indeseables, con lo que aumenta el rendimiento en hidrocarburos útiles. El azufre depositado sobre una superficie de molibdeno, beneficioso para la desulfuración de los tioles, lo es también para la de otros productos petroquímicos.

Nos propusimos descubrir los importantes intermedios de reacción que se producen mientras se elimina de los tioles el azufre por medio de un catalizador de molibdeno. Para identificarlos, conjugamos espectroscopía fotoelectrónica de rayos X y espectroscopía ARPEE. Nuestro análisis se complicaba por el hecho de que los tioles están formados por un gran número de átomos y reaccionan de distintas maneras con la superficie. Además, el gran tamaño de los reactivos hacía difícil la interpretación espectroscópica de los resultados; las moléculas que están compuestas por muchos átomos tienen un gran número de estados electrónicos y vibracionales. A pesar de todo, logramos acotar varios pasos de la



3. MOLECULA QUE CONTIENE AZUFRE unida a una superficie de molibdeno. La orientación de la molécula en la superficie se dedujo gracias a la espectroscopía electrónica.



do una molécula (*1*) basada en azufre, carbono e hidrógeno interacciona con molibdeno, pierde un hidrógeno y se une a la superficie (*2*). Se debilita entonces el enlace entre carbono y azufre (*3*), y los átomos restantes pueden recombinarse para formar etano (*4*).

desulfuración de tioles sobre molibdeno.

El análisis de los datos espectroscópicos revela la identidad de un intermedio de reacción sobre la superficie. Los datos también proporcionan información sobre los cambios que los enlaces internos de un intermedio de reacción padecen mientras interacciona con la superficie. En algunos casos, podemos incluso deducir la orientación de los intermedios a partir de los estudios espectroscópicos. Tal información estructural reviste particular interés a la hora de crear modelos teóricos de los enlaces con las superficies de los tioles y sus intermedios de reacción asociados. La espectroscopía infrarroja es una sonda estructural muy versátil porque las vibraciones moleculares que se detectan en un experimento de infrarrojo son sensibles a la simetría de la molécula.

Estos éxitos han impulsado la búsqueda de nuevas herramientas capaces de determinar estructuras moleculares sobre superficies. Es una de las fronteras de la química de superficies. Varias de las técnicas que están aflorando recurren a la radiación de sincrotrón, máquina que acelera electrones a lo largo de una trayectoria circular a una velocidad próxima a la de la luz; se generan con ello potentes haces de rayos X y otros tipos de radiación.

Durante los últimos cinco años, hemos usado el sincrotrón infrarrojo y otras técnicas para resolver cuáles son las etapas de la desulfuración y qué pasos resultan cruciales en la puesta a punto de la reacción. El primero de éstos es la escisión del enlace azufre-hidrógeno. Este paso, muy rápido, viene privilegiado porque tanto el azufre como el hidrógeno forman fuertes enlaces con la superficie de molibdeno. En pasos posteriores el enlace carbono-azufre ha de romperse, y se forma un enlace carbono-hidrógeno o bien se rompe, produciéndose hidrocarburos que se derivan del tiol. Por ejemplo, el etanotiol se une al catalizador, se rompe el enlace azufre-hidrógeno y se convierte en tiolato de etilo ($CH_3(CH_2)S$). El enlace carbono-azufre se rompe y, por último, la formación de un enlace carbono-hidrógeno proporciona etano, mientras que por la ruptura de tal enlace se obtiene eteno.

Los intermedios de reacción que se forman —el tiolato de etilo se convierte en etano o en eteno— tienen una vida media demasiado corta para ser detectados mediante espectroscopía de superficies. Se ha de recurrir, pues, a sondas indirectas. Estas indican que la ruptura del enlace carbono-azufre es el paso que limita la tasa de desulfuración del tiolato de etilo. Más aún, hemos encontrado indicios de que la fuerza del enlace carbono-azufre de las moléculas de tiol determina la proporción total de la reacción de desulfuración.

Con nuestro modelo general, y la información obtenida sobre la fuerza del enlace carbono-azufre, predijimos la proporción y el tipo de productos formados durante la desulfuración de tioles sobre superficies de molibdeno. La velocidad de formación de gas hidrógeno y de enlaces superficie-carbono —que son productos indeseados— depende en buena medida de que el enlace carbono-hidrógeno pueda o no romperse antes que el enlace carbono-azufre. Por consiguiente, de acuerdo con los principios fundamentales de la química, la fracción de intermedios de reacción del tiol que conducen a hidrocarburos aprovechables es proporcional a la tasa de ruptura del enlace carbono-azufre en su relación con la tasa de ruptura del enlace carbono-hidrógeno. Nosotros predijimos, pues, que los tioles con enlaces carbono-azufre débiles (con alta tasa de ruptura del enlace) ofrecerían un alto rendimiento de hidrocarburos. Esta conclusión ha sido confirmada por todos nuestros experimentos.

La desulfuración del petróleo, la eliminación del óxido nítrico de los tubos de escape de los coches y la síntesis de amoníaco son tres de las muchas áreas que se han beneficiado de la química de superficies. Aún son necesarios grandes avances técnicos y conceptuales si realmente se quiere entender cómo actúan las superficies sobre la formación de los enlaces y la estructura de los complejos intermedios de reacción.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

π-BONDED N_2 ON FE(111): THE PRECURSOR FOR DISSOCIATION. M. Grunze, M. Golze, W. Hirschwald, H.-J. Freund, H. Pulm, U. Seip, M. C. Tsai, G. Ertl, J. Küppers en *Physical Review Letters*, vol. 53, n.º 8, páginas 850-853; 20 de agosto de 1984.

MOLECULAR TRANSFORMATIONS ON SINGLE CRYSTAL METAL SURFACES. R. J. Madix en *Science*, vol. 233, páginas 1159-1166; 12 de septiembre de 1986.

MECHANISM OF THE NITRIC OXIDE-CARBON MONOXIDE REACTION OVER A SINGLE CRYSTAL RHODIUM CATALYST. Galen B. Fisher *et al.* en *Proceedings of the 9th International Congress on Catalysis*, vol. 3: *Characterization and Metal Catalysts*. Dirigido por M. J. Phillips y M. Ternan. Instituto Químico de Canadá, 1988.

SURFACE CHEMISTRY. John T. Yates, Jr., en *Chemical & Engineering News*, vol. 70, n.º 13, páginas 22-35; 30 de marzo de 1992.

El hombre moderno de Oriente Medio

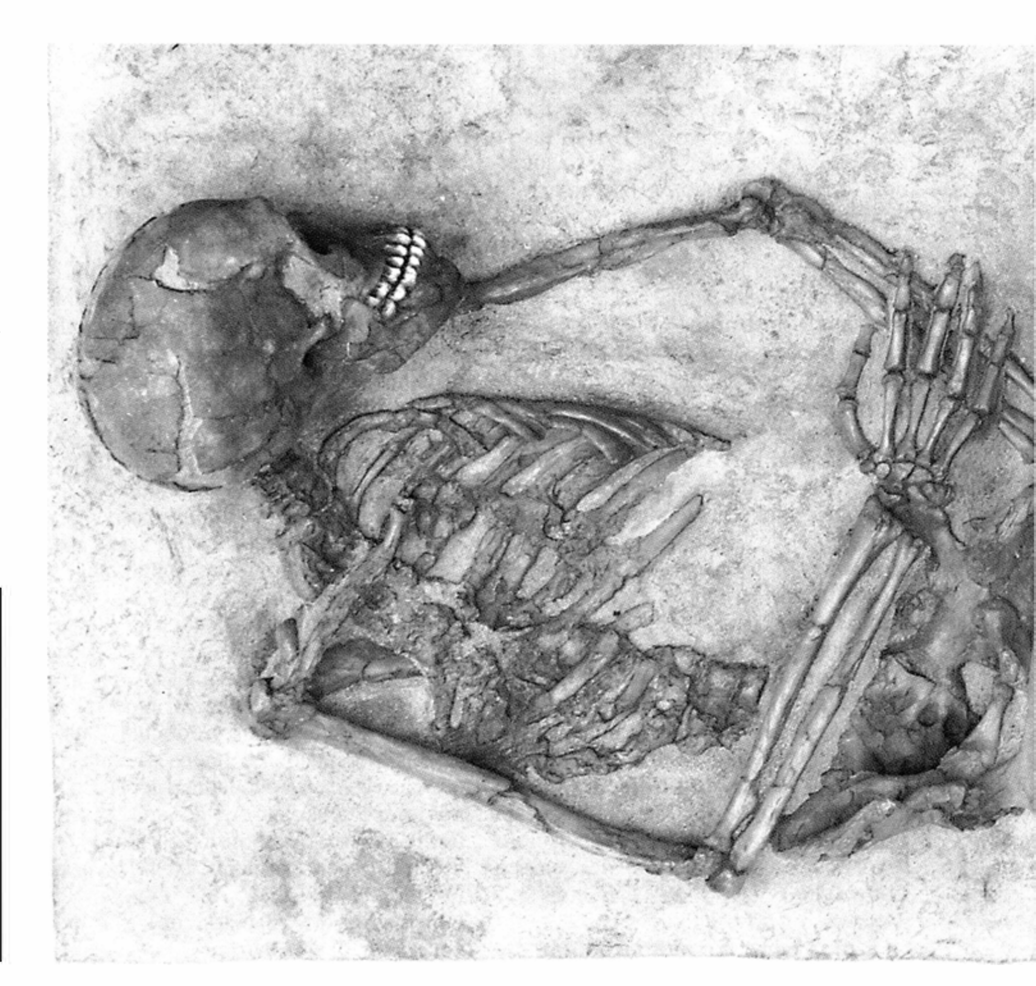
El Homo sapiens *moderno precedió a los neandertales en la región del monte Carmelo y siguió un patrón de vida similar durante 60.000 años. Los paleontólogos no logran explicar la revolución cultural que seguidamente se produjo*

Ofer Bar-Yosef y Bernard Vandermeersch

Entre 40.000 y 45.000 años ha, en el occidente de Eurasia, la cultura material cambió más de lo que había cambiado hasta entonces a lo largo de millones de años. Tan notable florecimiento de la creatividad técnica y artística significa la aparición de la primera cultura que los observadores suelen reconocer como distintivamente humana, por caracterizarla una inventiva y una variedad incesantes. En aquel breve período de alrededor de 5000 años, los útiles líticos, cuya forma había permanecido siglos inalterada, empezaron de pronto a diferenciarse de una centuria a otra y de una a otra región.

En términos técnicos, la transición del Paleolítico Medio al Paleolítico Superior estuvo marcada por la revolución cultural. Por qué y cómo se produjo ésta cuando se produjo constituyen dos cuestiones centrales en paleoantropología. De la respuesta que reciban depende quizá la resolución de otros enigmas, de manera muy particular el de la naturaleza y las causas de la aparición de un *Homo sapiens* con anatomía moderna.

Durante algunos años se creyó que la biología aportaría la explicación definitiva de dicha revolución cultural. Hubo dos tipos de humanos; uno, el neandertal, era más antiguo (así se pensaba) y más robusto que el otro, el de Cro-Magnon. Para idear una hipótesis biológica, los expertos sólo hubieron de asociar el tipo físico arcaico a la cultura del Paleolítico Medio y el tipo menos basto a la del Paleolítico Superior. Esa interpretación parecía acertada para el caso de Europa, que es donde se iniciaron las investigaciones paleoantropológicas. Aquí la rancia y estereotipada técnica Musteriense solía en general atribuirse a las fornidas gentes neandertales, mientras que la reciente técnica Auriñaciense, con las formas de sus utensilios innovadoras y en continuo cambio, iba asociada a los cromañones, de complexión más estirada y agraciada, que aparecen en el registro fósil con una antigüedad de alrededor de 30.000 años. (Los términos Musteriense y Auriñaciense remiten a los lugares de Francia en que tales restos se descubrieron.)



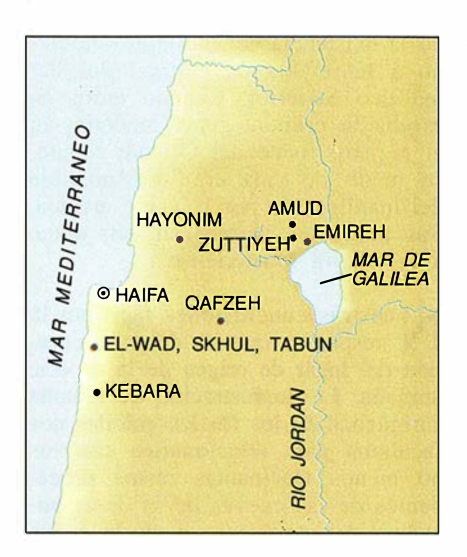
OFER BAR-YOSEF y BERNARD VANDERMEERSCH son los organizadores de un proyecto de excavaciones en las cuevas de Qafzeh, Kebara y Hanoyim, en Israel. Bar-Yosef enseña en el Museo Peabody de la Universidad de Harvard. Sus intereses se centran sobre el origen de los humanos modernos y la transición a la agricultura. Vandermeersch es profesor de antropología en la Universidad de Burdeos I. Se ha dedicado al estudio de los cambios biológicos y culturales de los humanos en el Pleistoceno Superior.

Esta nítida correlación entre biología y cultura tropezó con una dificultad en el Oriente Medio. Excavando allí, los paleontólogos encontraron varios grupos de fósiles en los que había especímenes que, al parecer, eran más antiguos que sus equivalentes europeos. Algunos parecían semejarse a los neandertales, otros a los Cro-Magnon. Pero todos aquellos grupos poseían, diríase, una misma y primitiva cultura material. ¿Cómo encajar a tales humanos y sus utensilios en el esquema aceptado en Europa?

Para dar una respuesta definitiva había que clasificar por orden cronológico los fósiles del Oriente Medio. La tarea dio unos resultados desalentadores. A los especímenes, demasiado antiguos, no podía datárseles por el consabido método del carbono 14, inservible para edades superiores a los 40.000 años; las secuencias uranio-torio requieren fósiles que estén asociados a sedimentos carbonatados, y la serie potasio-argón es más apta para la datación de lavas y tobas, que se hallan en estratos mucho más antiguos. A falta de una cronología definitiva, los antropólogos juzgaron razonable seguir el modelo europeo, a tenor del cual supusieron que los tipos robustos del Oriente Medio eran más antiguos que los tipos gráciles y que éstos descendían de aquéllos.

Para someter a prueba esta hipótesis, reunimos a un equipo interdisciplinar para establecer una cronología partiendo de distintas clases de datos. Los resultados conseguidos obligan a poner en cuestión la tradicional tesis evolutiva, que aporta más interrogantes que respuestas. Tales asertos, por estridentes que resuenen, no lo son; además, el envite de la dificultad es lo que mueve la ciencia.

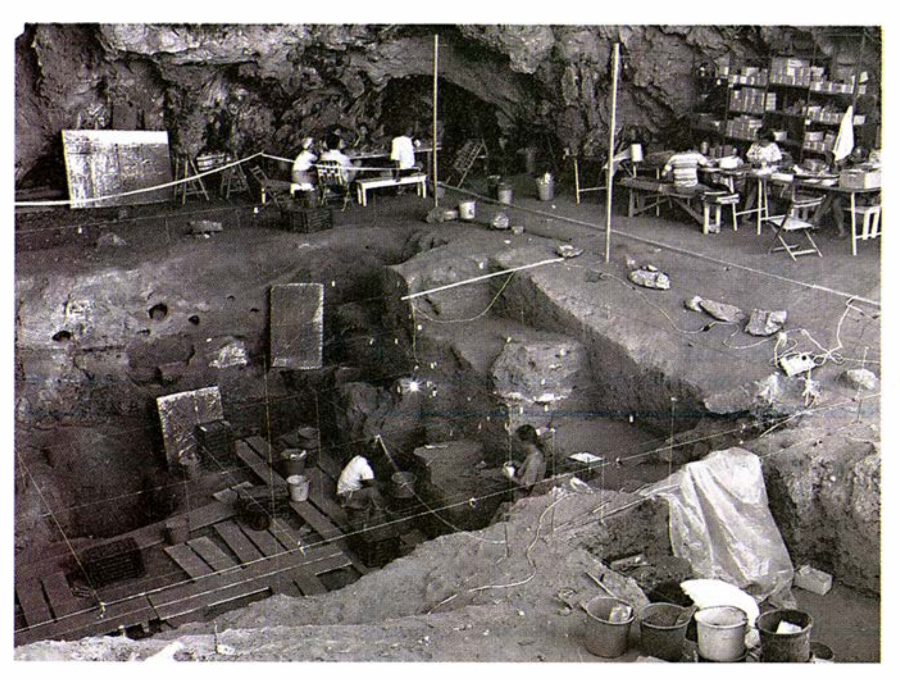
Empezamos por examinar las relaciones estratigráficas entre los fósiles homínidos de los yacimientos excavados en cuevas del Oriente Medio. A continuación, con nuestro colega Eitan Tchernov, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, pusimos en correlación esos datos con la información paleoclimática y otras, y llegamos a la conclusión de que el *H. sapiens* moderno había vivido en una de aquellas cuevas hace entre 80.000 y 100.000 años, mucho antes de su aparición en parte alguna. A comienzos de los años ochenta, nuestra propues-



1. ENTERRAMIENTO DOBLE excavado en la cueva de Qafzeh (*derecha*), testimonio de que hace unos 100.000 años había ya cierta sensibilidad religiosa. El cadáver del niño fue colocado a los pies del de una mujer joven, quizá su madre. Estos seres humanos parecen enteramente modernos, pero su cultura se asemejaba a la de los neandertales del Oriente Medio, que eran de complexión más robusta. En la Europa de unos 60.000 años después serían diferentes la cultura de los pobladores de aspecto moderno y la de los neandertales.

ta fue rechazada, pero no tardamos en corroborarla valiéndonos de dos técnicas radiométricas —termoluminiscencia y resonancia de espín electrónico— que acababan de perfeccionarse por entonces.

Los resultados dieron al traste con la relación genealógica que durante tanto tiempo habíase mantenido. En lo sucesivo no podría ya sostenerse que los seres que mostraban aquellos esqueletos robustos eran antepasados de los de esqueletos gráciles. Y, a la vez, sería imposible seguir atribuyendo la existencia del individuo moderno a la revolución cultural del Paleolítico Superior. Cuando entró en escena la primera gente moderna en el registro físico del Oriente Medio, su modo de vida era indistinguible del manifestado por la gente arcaica. Sus artefactos pertenecen, sin duda, a la cultura Musteriense.



2. ENREJILLADO TRIDIMENSIONAL (*arriba*) para registrar la localización exacta de cada hueso y de cada artefacto y examinar microscópicamente finas secciones de sedimentos. Con estas técnicas se sitúan los objetos en el tiempo y se distinguen los períodos en que la cueva fue habitada, continua o intermitentemente, por seres humanos. El corte transversal esquemático (*derecha*) muestra el proceso de las excavaciones hechas por los autores en la boca de la cueva y en la cámara que se extiende bajo su gran cúpula. Algunas partes se han dejado intactas para que las exploren futuros arqueólogos, regla a la que se atuvo Moshe Stekelis en los años cincuenta, pero no Francis Turville-Petre en los treinta.

Nuestras conclusiones facilitan la respuesta que se dé a la cuestión del lugar de origen de la especie humana. La demostración de tamaña antigüedad de los fósiles gráciles nos facultaba para relacionarlos con los no menos fascinantes restos procedentes de las cuevas de la desembocadura del río Klasies y de la cueva Border, en Sudáfrica. Los fósiles sudafricanos parecían también muy antiguos y más estrechamente relacionados con gentes modernas que no con las arcaicas. ¿Podrían haber pertenecido los dos grupos a un único tipo de pobladores muy difundido? Algunos antropólogos se inclinan por la respuesta afirmativa y defienden que los humanos de aspecto moderno aparecieron en Africa y fueron después remplazando a los grupos arcaicos en otras partes del mundo.

Por ironía de las cosas, en las mismas fechas en que se estaban tomando en consideración los nuevos datos, llegaban los biólogos moleculares a conclusiones similares respecto al lugar de origen. No trabajaban con huesos fósiles, al modo de los paleontólogos, sino con el fósil viviente del ADN, que en sus muchas variantes registra una parte del curso de la evolución. Comparando gran cantidad de muestras procedentes de poblaciones de distintas zonas del mundo, algunos infirieron que los humanos modernos surgieron en el Africa Subsahariana hace más de 100.000 años.

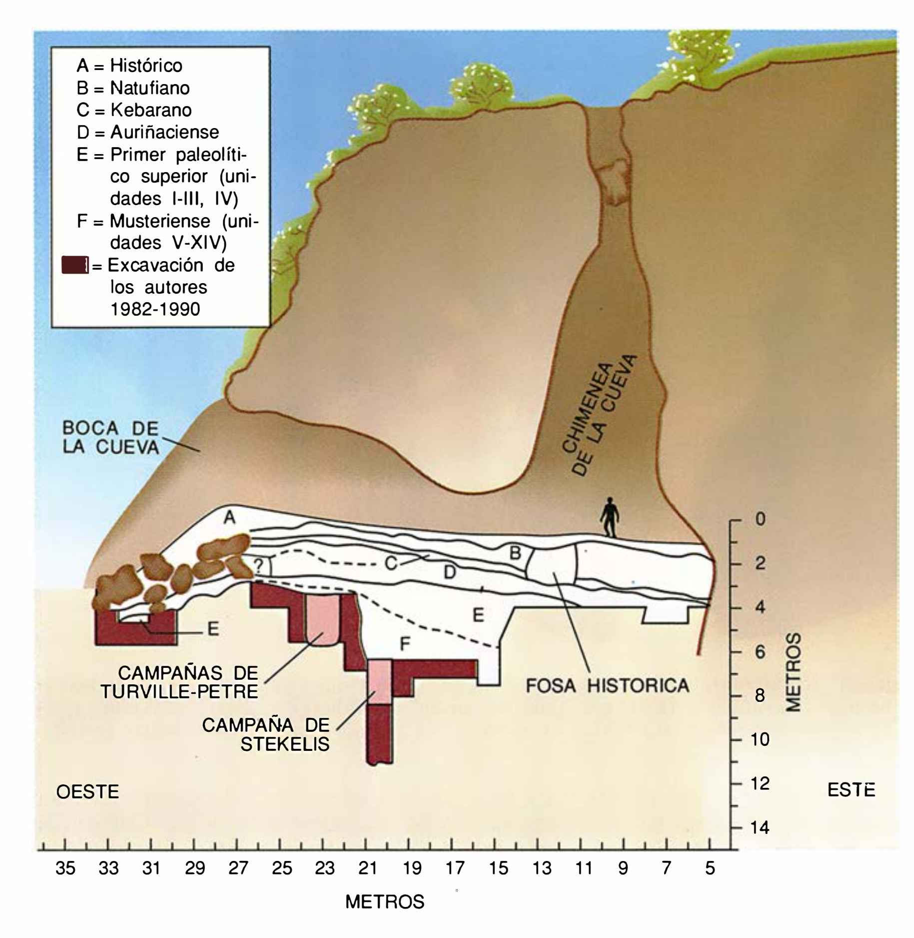
Otros investigadores rechazan ciertos aspectos de este análisis genético, sobre todo la filogenia o el árbol genealógico que se propone. Abogan por un modelo multirregional, interpretación rival que sostiene que los pobladores de aspecto moderno aparecieron casi simultáneamente en muchos sitios y que el flujo génico, o hibridación, mantuvo la unidad de la especie.

La investigación sobre los homínidos del Oriente Medio comenzó en 1929, cuando Dorothy A. E. Garrod, arqueóloga de la Universidad de Cambridge, inició un proyecto quinquenal para excavar Skhul, Tabun y el-Wad, tres cuevas que se hallan a la entrada de Wadi el-Mugharah (hoy Nakhal HaMe'arot). En su trabajo de campo descubrió la secuencia del Paleolítico Superior básica para toda la prehistoria del Oriente Medio. La estratigrafía más profunda, de Tabun, llegó hasta los 23 metros. Garrod clasificó los horizontes de arriba abajo según los artefactos que los caracterizaban: Achelense Superior (estratos G-F), Achelense-Yabrudiano (estrato E) y el Musteriense Paleolítico Medio (estratos D, C y B y horizonte último).

Garrod desenterró también los restos de una mujer adulta, atribuidos a una neandertal y datados provisionalmente como de 60.000 años de antigüedad. Aunque no logró determinar si tales restos estaban situados en el horizonte B o en el C, no le cupieron dudas de que una mandíbula que encontró debajo mismo de ellos pertenecía al estrato C. Esta mandíbula, también de un adulto joven, parecía paradójicamente más afín a la grácil morfología de la gente de Qafzeh que a la robusta complexión de los neandertales.

La cueva de Skhul arrojó una extraordinaria colección de restos óseos humanos del Paleolítico Medio, entre ellos varios esqueletos en sus bien conservados enterramientos. A nuestro entender, la disposición en que apareció el esqueleto de la mujer atestigua un enterramiento deliberado, el más antiguo de cuantos se conocen. Y como tan elaborado proceder es imposible sin pensamiento simbólico, tal hallazgo proporciona una prueba indirecta de la existencia del lenguaje. Por lo demás, según lo vamos a exponer enseguida, las prácticas mortuorias de los neandertales —junto con su técnica lítica— en nada son inferiores a las de los gráciles homínidos que les precedieron en aquella zona.

El primer examen detenido de estos materiales se llevó a cabo bajo la dirección de Sir Arthur Keith, del Real Colegio de Cirujanos de Londres, y Theodore D. McCown, luego profesor de la Universidad de California en Berkeley. Tratando como una unidad todo el conjunto de restos procedentes de Skhul y de Tabun, determinaron que aquellos es-



queletos representaban una forma intermedia entre los neandertales y los humanos modernos. Algunos antropólogos han considerado estos especímenes como posibles híbridos; otros los tienen por una población que evolucionó localmente.

En la misma década se hicieron también sorprendentes descubrimientos en Qafzeh, imponente caverna próxima a Nazareth, a 35 kilómetros del monte Carmelo en línea recta. Entre 1933 y 1935 René Neuville, cónsul de Francia en Jerusalén y miembro del Instituto de Paleontología Humana de París, dirigió, junto con Moshe Stekelis, de la Universidad Hebrea, las excavaciones que allí se realizaron. Fuera de la estancia principal, en los estratos del Paleolítico Medio próximos a la entrada y en la terraza que hay frente a la cueva se excavaron más de cuatro metros de escombros; salieron a la luz varios fósiles humanos.

Aunque los investigadores no publicaron descripciones detalladas de esos fósiles, Henri V. Vallois, del Instituto de Paleontología Humana, se aventuró a incluirlos entre los neandertales primitivos o no clásicos. Por los años cincuenta, F. Clark Howell, de Berkeley, sugirió que los esqueletos de aspecto más moderno, con el cráneo redondeado y el rostro plano, serían antepasados de los cromañones europeos. Por ese mismo motivo, pertenecen, según muchos, al grupo Proto-Cro-Magnon.

En otros yacimientos de diversos lugares del Oriente Medio se fueron encontrando más y más fósiles del Paleolítico Medio durante los años cincuenta y primeros sesenta. Ralph S. Solecki, entonces en la Universidad de Columbia, desenterró dos grupos de esqueletos en la cueva Shanidar, al pie de los montes Zagros, en Irak. Ambos conjuntos eran de neandertales y los dos mostraban indicios evidentes de comportamiento humano, o, por mejor decir, de sensibilidad humanitaria. Un grupo incluía el esqueleto de un hombre que había sobrevivido a la pérdida de un brazo, lo cual seguramente le habría sido imposible si no tuviese alguien que le cuidara con asiduidad. En los restos del otro grupo se advertían claras señales de inhumación deliberada, mayor prueba aún de conducta humanitaria. Un enterramiento neandertal parecido fue hallado en la cueva Amud, cerca del mar de Galilea, por Hisashi Suzuki, de la Universidad de Tokio.

Así, por los años setenta, respecto a los fósiles del Pleistoceno Superior que hubiera en el Oriente Medio parecía bastante obvia la hipótesis secuencial. Los neandertales del Asia occidental estarían representados por los restos óseos procedentes de las cuevas de Tabun, Amud y Shanidar. Se sugirió que esta población habría evolucionado luego hasta transformarse en los protocromañones locales de Skhul y de Qafzeh.

Dos modelos rivales trataron de explicar el estadio siguiente, que comenzó hace 40.000 años. Para el primero, la población mediooriental de humanos modernos se movió o difundió por Europa remplazando a los neandertales o mezclándose con ellos. De acuerdo con el segundo, poblaciones locales de neandertales euroasiáticos habrían ido evolucionando *in situ* hacia formas modernas. William W. Howells, de la Universidad de Harvard, motejó a estas dos teorías llamándolas respectivamente "la del Arca de Noé" y "la de la fase neandertal". Hoy perviven aún, con modificaciones para dar cuenta de nuestros nuevos datos, en las hipótesis "fuera de Africa" y "multiregional".

Por los años sesenta, los paleontólogos se fueron percatando de que el examen estratigráfico de las cuevas era una labor mucho más compleja de lo que habían sospechado. Nosotros atacamos el problema en las cuevas del monte Carmelo con todo el peso de las modernas técnicas excavatorias. Cada fragmento fósil y cada artefacto humano quedó localizado en una rejilla tridimensional. Geólogos y micromorfólogos examinaron los sedimentos indagando si habrían sido tal vez alterados por animales o por seres humanos de períodos estratigráficamente posteriores. Los resultados polínicos y otros datos microscópicos se pusieron en correlación con las condiciones climáticas reconstruidas.

Tan sistemática reinvestigación la iniciamos en Tabun, cuya potente secuencia deposicional proporcionaba un excelente registro a largo plazo de los cambios culturales. Allí las excavaciones habían sido dirigidas entre 1967 y 1972 por Arthur J. Jelinek, de la Universidad de Arizona, y, más recientemente, por Avraham Ronen, de Haifa. La segunda cueva, Qafzeh, fue excavada por Vandermeersch desde 1965 hasta 1979; Bar-Yosef se unió al proyecto durante las dos últimas temporadas.

En Tabun las excavaciones desenterraron numerosas claves geológicas y múltiples artefactos de piedra bien conservados, pero en cuanto a huesos sólo algunos de roedores: copro-




3. "GRACIL" Y "ROBUSTO": el cráneo "grácil" (*izquierda*), desenterrado en Qafzeh, es moderno en su bóveda (elevada y breve) y en la definición de su mandíbula. El cráneo robusto (*derecha*), de Amud, presenta rasgos neandertales: zona mesofacial prominente y occipucio oblongo y abultado. Ambos grupos tenían el cerebro tan grande como el de la gente actual.

litos de las lechuzas, que no compartían las cuevas con los humanos. Los paleontólogos se valen de esos restos de roedores para reconstruir el escenario y poner los estratos en orden cronológico.

Mientras se estudiaban en detalle los artefactos líticos, notó Jelinek que la densidad de lascas iba disminuyendo, al progresar por los estratos, desde los horizontes C y D (Musteriense) hasta el E (Achelense-Yabrudiano) y el F (Achelense tardío). E hizo ver que, en la correlación de esta tendencia con la escala temporal propuesta para la cueva Tabun, la curva resultante formaba un ángulo, indicador de la súbita aceleración del proceso. Jelinek sugirió que la aceleración reflejaría una transición evolutiva de los neandertales a los humanos modernos.

William R. Farrand, de la Universidad de Michigan, calculó una tabla cronológica para Tabun apoyándose en la acumulación sedimentaria del yacimiento. Interpretó la uniforme masa arenosa del fondo, que incluía la mayor parte de los estratos G, F y E, como restos de dunas llevadas hasta la boca de la cueva por un mar invasor —al derretirse capas del hielo polar durante el último período interglacial, hace unos 100.000 años. El suelo de loess de la capa D señalaría que, hace unos 75.000 años, empezó un nuevo clima frío, el del período Musteriense. Las zonas superiores de la secuencia, los estratos C y B y el último apical, se habrían acumulado en un período reciente, de los 55.000 a los 40.000 años ha, cuando la abertura de la chimenea de la cueva dejó que el agua de lluvia fuese puliendo la característica "tierra roja" mediterránea.

Pero no tardó mucho en verse que tal reconstrucción chocaba con los análisis de la fauna fósil de Tabun y Qafzeh, realizados bajo la dirección de Tchernov. Este había hallado que, en Qafzeh, algunos estratos con restos de homínidos alojaban varias especies de roedores arcaicos no representadas en la capa C de Tabun. Tal diferencia entre los marcadores animales nos dice que los dos grupos de homínidos habían vivido en tiempos distintos. Esta interpretación nos llevó a reconsiderar las estratigrafías de la cueva y los cuerpos humanos que habían ocultado.

En Qafzeh hay, por lo menos, tres enterramientos de seres humanos de aspecto moderno. Su situación en los sedimentos constituía, pensamos, nuestra mejor clave para averiguar su antigüedad. Uno de los enterramientos es el de un adulto que, arrebujado casi todo él sobre sus rodillas, yace del costado derecho dentro de un reducido nicho natural del muro de piedra caliza. El segundo es un enterramiento doble, el único, que se sepa, del mundo del Paleolítico Medio; guardaba el esqueleto de una mujer de entre 18 y 20 años de edad, yacente sobre su costado derecho, con las manos sobre el abdomen y las piernas a medio doblar, y a sus pies y perpendicular a su cuerpo, el esqueleto de un niño de unos seis años. Como los dos esqueletos yacían en posición horizontal, al través de los estratos del yacimiento y con una configuración que parecía ajustarse a los límites de una fosa rectangular, parece ser que el doble enterramiento se hizo en una tumba cavada de intento.

El tercer enterrado, un muchacho de unos 13 años de edad, se recuperó en una cavidad tallada en una blanda roca madre. El cadáver quedó colocado en posición supina, con la cabeza apoyada en la pared de la tumba y vueltas hacia arriba las manos, sobre cuyas palmas colocaron una gran cuerna de antílope que cruzaba también parte del pecho. El que la cuerna se librase de la rapiña de las hienas es prueba de que fue enterrada deliberadamente. En esta práctica y en sus utensilios no puede decirse que las primeras gentes modernas se diferenciaran fundamentalmente de las más robustas que vinieron después a la región.

La abundancia de restos de roedores en las capas inferiores indica que durante este período los humanos ocuparon la cueva sólo a intervalos intermitentes, estacionales tal vez. De todos modos, su anual ronda de forrajeo parece ser que llegaba nada menos que, por el este, hasta el valle del Jordán y, por el oeste, hasta la costa del Mediterráneo, a unos 40 kilómetros de distancia. Su cosecha marina la representan perforadas conchas del molusco *Glycymeris*,

descubiertas en los estratos inferiores. ¿Para qué podrían servir los orificios hechos en esas conchas si no para enhebrarlas en forma de collar, adorno o amuleto? Finalidades que certifican la presencia de pensamiento simbólico.

Encontramos, por último, un pedrusco de color ocre rojizo que estaba lleno de estrías y con claras señales de raspaduras. Un examen microscópico de los artefactos de piedra realizado por John J. Shea, entonces en Harvard, reveló la presencia de ocre rojo en filos trabajados de varios útiles. En épocas posteriores este material ha servido de pigmento y, mezclado con aceite, de agente impermeabilizador.

En 1979, durante la temporada final de las excavaciones, nos empeñamos en la reconstrucción de la secuencia paleoclimática. Primero nos servimos de los estratos de Qafzeh, en los que había fósiles de roedores, para calibrar la secuencia climática de Tabun; después aplicamos la secuencia a las unidades de Qafzeh en que se habían hallado los fósiles humanos. Por último, pusimos en correlación la secuencia con los estadios isotópicos de muestras procedentes del fondo marino. El proceso de triangulación es el que parece sugerir que los homínidos de Qafzeh vivieron en un pasado de hace 80.000 a 100.000 años.

Las fuertes críticas de que fuimos objeto nos indujeron a tratar de resolver el problema de dos maneras: aplicaríamos los métodos de datación recientes y elegiríamos un yacimiento cuyo estado de conservación permitiese reconstruir mejor las pautas de conducta. Incluiríamos entre éstas el empleo del fuego, la asignación de los desechos a una zona de la cueva, el tipo de alimentos vegetales que se había almacenado y los animales que fueron cazados, entrampados, escamondados o carroñeados. Sólo con un cuadro así (en vez del acostumbrado que atiende a la mera técnica lítica) creemos que se puede averiguar si los hombres del Proto-Cro-Magnon y los neandertales del Oriente Medio constituyeron o no dos poblaciones o especies distintas.

La cueva Kebara, en la escarpadura occidental del monte Carmelo, fue de obvia elección por lo muy completo de su registro sedimentario. Abriéndose su boca en arco a unos 60 metros sobre el nivel del mar, en la dirección nord-noroeste, apenas se modificó durante el período Paleolítico y sólo un posterior deslizamiento de rocas ha creado ante ella una pequeña terraza. Comenzamos a excavar allí en 1982.

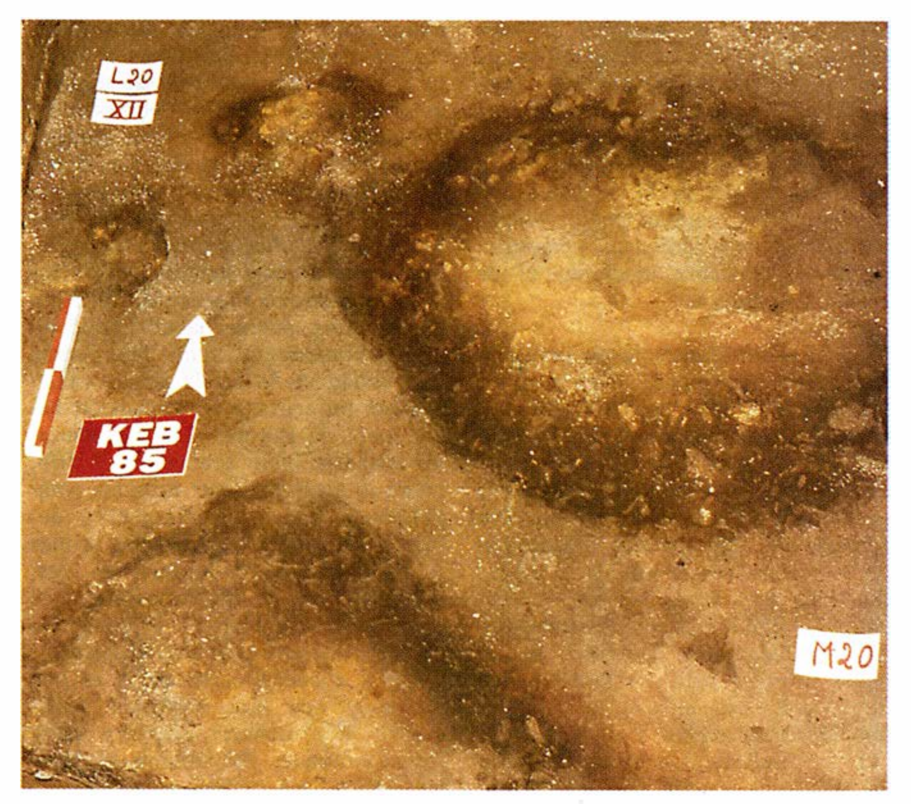
La mayoría de los estratos a partir del Paleolítico Superior habían sido removidos en los años treinta, durante las excavaciones dirigidas por Francis Turville-Petre, estudioso independiente que colaboraba con la Escuela Británica de Arqueología de Jerusalén. En 1951 reanudó las excavaciones Stekelis, cuyo equipo, a lo largo de más de 14 años, fue sacando a la luz los horizontes del Paleolítico Medio y, con ellos, los restos de un bebé neandertal.

Estudiamos con detenimiento esos estratos, en particular las capas asociadas a una sucesión de períodos de habitación humana. Los artefactos líticos resultan bastante parecidos a los del estrato B de Tabun y a los de Amud, no tanto por su forma general (que no varió durante todo el Musteriense) cuanto por los procedimientos de su fabricación.

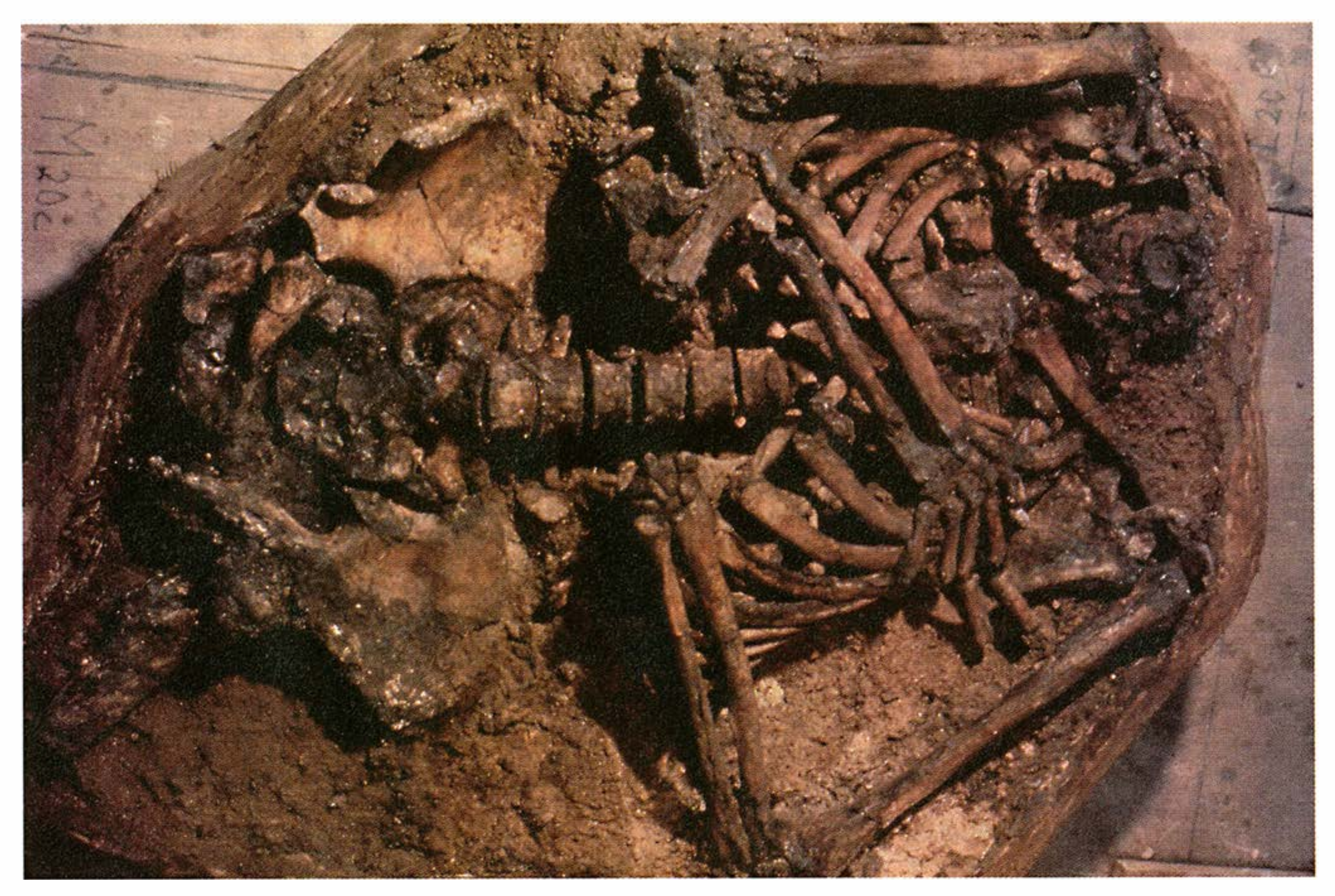
El descubrimiento más sorprendente, hecho en 1983, fue el del enterramiento de un varón adulto en el interior de un hoyo; una datación le calculó unos 60.000 años de antigüedad. Faltaban el cráneo y la pierna y el pie derechos, y el pie izquierdo había sido destruido por aguas filtradas. Al parecer, el cráneo lo quitó alguien deliberadamente, una vez podridas ya las carnes, quizá muchos meses después de que el hombre muriera; de otro modo sería inexplicable la ordenada disposición en que se encuentran los huesos, sobre todo la mandíbula inferior, que sigue en su sitio. Pero, ¿qué motivo religioso pudo inspirar semejante práctica funeraria?

El hallazgo de esa mandíbula es lo más destacable. Por su forma, es la mandíbula de un neandertal, pero, a diferencia de otros casos, se ha conservado junto a ella el hioides, el hueso solitario que controla la lengua. Fijándose en la forma del hueso infirió el equipo de Baruch Arensburg, de la Universidad de Tel Aviv, que el tracto vocal de aquel hombre era parecido al de la gente moderna y que, probablemente, fue capaz de hacer muchas de las vocalizaciones que son necesarias para que se dé un lenguaje articulado. Otro hueso, el innominado, persuadió a Yoel Rak, de la Universidad de Tel Aviv, de que la pelvis era más afín a la de los neandertales que a la de la gente moderna.

Para hacer inferencias respecto al lenguaje y a otras notas de la conducta humana se requieren más datos de los que los huesos solos pueden proporcionar. Hay que reconstruir las acciones a partir de los objetos sobre los cuales se efectuaron: los artefac-



4. RESTOS DE HOGARES encontrados en medio de la cueva Kebara. Los restos de desperdicios aparecieron siempre junto a los muros, lo cual supone un modo de comportamiento moderno: procurar la limpieza.



5. AL CADAVER DE ESTE HOMBRE NEANDERTAL hallado en Kebara le había sido extrañamente quitado el cráneo una vez descompuestas ya sus carnes, pero le dejaron en su sitio la mandíbula inferior y el hioides o hueso de la lengua. La forma de este último sugiere que los primeros humanos podían producir sonidos articulados como los producen los modernos.

tos arqueológicos. Algunos de esos rasgos característicos se perciben en los estratos del Musteriense. La mayoría de los huesos y restos de desperdicios fueron hallados junto a los muros de la cueva, mientras que la parte central del suelo de la cámara la cubrían los residuos de los fuegos o fogones. Esto indica un comportamiento típicamente moderno: el de procurar limpieza.

La evidente presencia de humanos morfológicamente modernos en Oriente Medio hace unos 100.000 años arroja una luz nueva sobre otros fósiles del occidente de Asia. Los humanos modernos puede que tengan una genealogía local bastante amplia. Por ejemplo, el fragmentario cráneo hallado por Turville-Petre en la cueva Zuttiyeh, cerca de Amud, resulta tener entre los 200.000 y los 250.000 años de antigüedad. Ese individuo podría haber formado parte de la población de la que descendiesen los gráciles pobladores de Skhul y de Qafzeh.

Los neandertales, empero, no parece que hayan tenido antepasados locales; el único registro de pre-neandertales se da en Europa, donde se remonta hasta los 150.000 años de antigüedad. A falta de otros datos fósiles, hemos de limitarnos a admitir que los neandertales de Kebara descendían de la estirpe europea. La población fundadora, o bien inmigró desde Europa hasta el Oriente Medio en el transcurso de una sola generación, o bien, lo que parece más probable, se fue expandiendo gradualmente durante muchas generaciones. Este último proceso de difusión demográfica podría haber implicado algún cruzamiento con las gentes que vivían en la senda migratoria.

¿Qué induciría a tal expansión hacia fuera de Europa? Los neandertales estaban bien adaptados al frío, como lo atestiguan sus fornidas complexiones, mas ni siquiera ellos debieron de poder resistir los climas árticos que se produjeron, en casi repentinas oleadas de frío, durante el período de entre los 115.000 y los 65.000 años atrás. El frío intenso les forzaría a encaminarse hacia el sur. En apoyo de esta hipótesis puede citarse la semejanza que hay entre los neandertales del Oriente Medio y un cráneo, más antiguo, procedente de Saccopastore, en Italia. Esta similaridad sugiere que la expansión desde Europa seguiría la ribera mediterránea, pasando quizá por los Balcanes o por la Turquía moderna.

¿A quiénes encontraron los neandertales al llegar al Oriente Medio? Podrían examinarse varias hipótesis. Cabe imaginar que el frío obligara a la gente menos fuerte a adentrarse en Africa, igual que obligó a la más fuerte a pasar al Oriente Medio, impidiéndose así el contacto entre los dos grupos. Ahora bien, si los descendientes de la población menos fuerte siguieron aguantando en la zona, puede que coexistieran allí con los advenidos neandertales e incluso que se cruzara su estirpe con la de ellos. Algunos especialistas consideran improbable tal hibridación y prefieren tener a las dos poblaciones por especies distintas.

Los paleoantropólogos acostumbran paliar la escasez de restos humanos fósiles con inferencias conductuales a partir de los modos de fabricar los utensilios, de las distintas técnicas de forrajeo y de tratamiento de la alimentación, de la presencia o ausencia de fogones y de las pruebas de actividad artística. Pero las inferencias basadas en los restos arqueológicos también distan mucho de ser definitivas.

Utensilios de piedra toscamente labrados y las esquirlas de su desbaste son los restos que más abundan en los yacimientos paleolíticos. Los materiales del Paleolítico Medio hallaron una clasificación sistemática en manos de François H. Bordes, quien interpretó las diferencias observables entre los útiles diciendo que demostraban la presencia de varias tribus prehistóricas. Pero Lewis R. Binford, de la Universidad Metodista del Sur, ha puesto en cuestión el razonamiento del arqueólogo francés. Defiende la probabilidad de que los homínidos del Paleolítico Medio fuesen una única población y empleasen diferentes tipos de utensilios para realizar distintas tareas.

El debate llevó a dos décadas de intensa investigación microscópica sobre utensilios que iban fabricándose y usándose de un modo o del otro; se comparaban luego las formas de desgaste con las encontradas en los útiles antiguos. Mas con tal estudio no podían averiguarse los fines a que fueran aplicados los utensilios musterienses. En la mayoría de los casos, la forma no estaría en correlación con la función. Aunque hubiese excepciones a la regla, está claro que los raspadores, útil predominante, se emplearían para diversos menesteres.

Una inferencia conductual que sí es factible a partir de los restos de útiles es la estimación del alcance con que aquellos humanos hacían planes para el futuro. Diversos estudios han demostrado que sabían distinguir muy bien y valorar la piedra idónea y que no era raro que recorriesen grandes distancias para obtenerla. Los prehistóricos no desechaban a la ligera los artefactos hechos de materiales de primera calidad, pero tampoco dudaban en desprenderse de los de peor clase, a menudo muy poco después de haber encontrado esos materiales y de haberlos tallado y usado.

Como el Oriente Medio es rico en piedra pedernal, sus habitantes del Paleolítico Medio sólo tenían que andar unos pocos kilómetros para obtener nódulos de calidad. A veces tallaban los morrillos donde los cogían; con frecuencia se los llevaban en bruto para tallarlos luego en la cueva. En unos y otros casos les daban la forma que querían quitando de la masa del pedrusco, a golpes, las lascas, aristas y puntas que estuvieran de más. Después de usar el utensilio resultante, a veces se le daba otra forma nueva. Toda esta serie de operaciones evidencia que se hacían planes a largo plazo, un rasgo característico del humano.

Las inconfundibles señales de enterramientos deliberados en Qafzeh, Skhul, Amud y Kebara; las conchas marinas perforadas en Skhul y Qafzeh; y el ocre rojo empleado en estas dos cuevas y en la de Hayonim, todo ello atestigua que hubo conducta simbolizante. El hueso hioides de moderno aspecto del neandertal de Kebara sugiere que había evolucionado ya el lenguaje articulado. Los homínidos del Paleolítico Medio poseían los elementos constitutivos de la modernidad, pero la andadura de las innovaciones fue inexplicablemente lenta.

La solución del debatido problema filogenético habrá de venir de los estudios del ADN que se recupere de los huesos bien conservados. Pero la filogenia no puede explicar la revolución cultural que dio paso al período Paleolítico Superior. Para resolver este problema, los especialistas han de inferir cambios en el comportamiento humano partiendo de los sutiles indicios del registro físico.

Geólogos, micromorfólogos y otros expertos deben conjuntar sus esfuerzos para distinguir los residuos de la actividad humana y no confundirlos con los de los animales y otros agentes de la naturaleza. Compete luego a los arqueólogos caracterizar las diversas disposiciones de los campamentos del Paleolítico Medio y del Superior y tratar de ver, en las diferencias, indicios de los cambios que condujeron a la explosión innovadora. Así como ningún historiador podría explicar la Revolución Industrial sin hacer referencia a la Ilustración, tampoco puede el prehistoriador explicar el repentino avance técnico de hace unos 40.000 años sin resolver antes el misterio de la vida musteriense.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE SHANIDAR NEANDERTALS. E. Trinkaus. Academic Press, 1983.

WESTERN ASIA. E. Trinkaus en *The Origins of Modern Humans: A World Survey of the Fossil Evidence.* Dirigido por F. H. Smith y F. Spencer. Alan R. Liss, 1984.

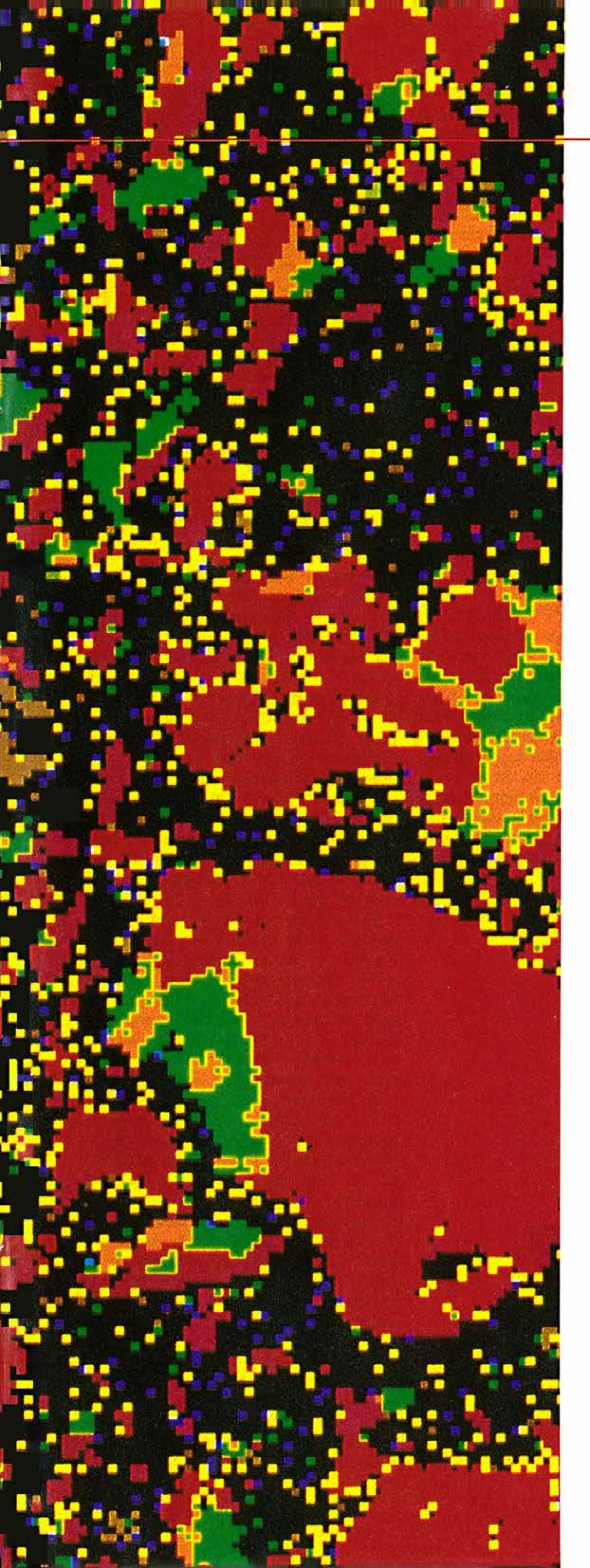
THERMOLUMINESCENCE DATING OF MOUSTERIAN 'PROTO-CRO-MAGNON' REMAINS FROM ISRAEL AND THE ORIGIN OF MODERN MAN. H. Valladas, J. L. Reyss, J. L. Joron, G. Valladas, O. Bar-Yosef y B. Vandermeersch en *Nature*, vol. 331, n.º 6157, págs. 614-616 ; 18 de febrero de 1988.

ELECTRON SPIN RESONANCE DATING AND THE EVOLUTION OF MODERN HUMANS. R. Grün y C. B. Stringer en *Archaeometry*, vol. 33, parte 2.ª, págs. 153-199; agosto de 1991.



CLAVES DE HORMIGON

Gary Stix



En reparar las carreteras en mal estado y crear otras nuevas se gastan las naciones cuantiosas sumas de dinero. Sangría que podría paliarse fomentando el desarrollo de nuevos materiales de aplicación en obras públicas.

Una espectacular oleada de rojos, amarillos, verdes y naranjas llena la pantalla del ordenador. No es una obra de arte, ni un elemento decorativo. A medida que la simulada hidratación progresa, la imagen vira al amarillo brillante, salpicado de manchas azules y rojas. Es un modelo informático del proceso de constitución del hormigón, obra de un ingeniero y un científico del Instituto Nacional de Normalización de los Estados Unidos (NIST) que se aprestan a comprender mejor tan ubicua sustancia. Y es que el hormigón, el más corriente de los materiales de construcción, vuelve a estar de moda. Mejorarlo no es asunto trivial. Que la restauración de las infraestructuras de los Estados Unidos, tema candente allí y de gran peso económico, dependa, seguramente, de su evolución en cuanto producto de alta tecnología, lo demuestra. Va creciendo el número de científicos, políticos y empresarios que consideran tan rentables estas investigaciones como las destinadas a conseguir transistores más diminutos o más ligeros fuselajes de aeronaves. Ganar un solo punto en el porcentaje de duración de puentes y carreteras a lo largo de 20 años proporcionaría un ahorro de 10.000 a 30.000 millones de dólares que ayudaría a compensar los cuantiosos gastos de mantenimiento de la red. Por otra parte, en 1995, el 35 % de los pavimentos de las rutas interestatales habrán sobrepasado su período de vida útil, y la reparación de puentes y carreteras en mal estado supondrá un gasto de 167.000 millones de dólares, sin contar los 123.000 millones que llevaría el añadir carriles para vehículos con varios ocupantes y otras reformas dirigidas a aliviar la fuerte congestión

1. FANTASIA EN CEMENTO, concebida en el Instituto Nacional de Normalización, que simula las primeras fases de la reacción de hidratación del cemento. Esta modelación en ordenador ayudará a diseñar nuevas versiones de los materiales de construcción ordinarios, con las que se podría obtener unas duración mayor de las infraestructuras remozadas.

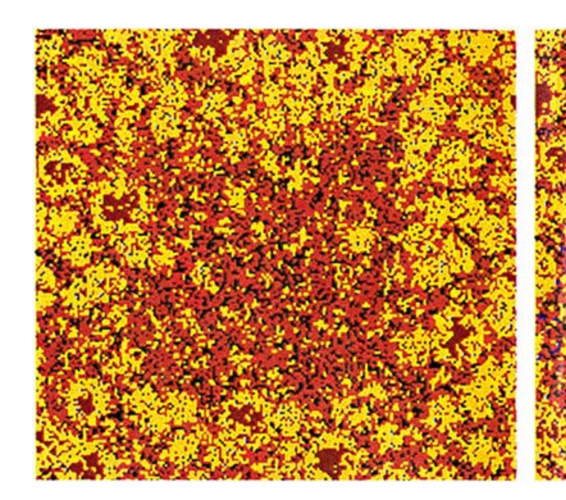
de tráfico padecida. El bache, antes asunto favorito en las elecciones municipales, se ha convertido en un problema nacional. Clinton ha destinado la mitad de los diez mil millones de dolares de su proyectado programa para la creación de empleo a obras públicas.

Pero estas inversiones quizá no produjesen otra cosa que meros remiendos si se utilizaran materiales tan antiguos como los que constituyen los pavimentos y pilares que se pretende reemplazar. Hasta finales de los ochenta, los políticos, y muchos científicos, no reconocieron la necesidad de utilizar mejores materiales básicos en los puentes, calzadas, diques o albañales. La administración Reagan quiso eliminar el Centro de Tecnología de la Construcción del NIST y privatizar el principal instituto de investigación de la Administración Federal de Carreteras (FHWA). Todavía son minúsculas las cantidades que dedican a investigación de materiales el Departamento de Transportes y la Agencia de Protección Medioambiental en comparación con las sumas que se invierten en materiales para usos militares o en superconductividad para aplicaciones energéticas.

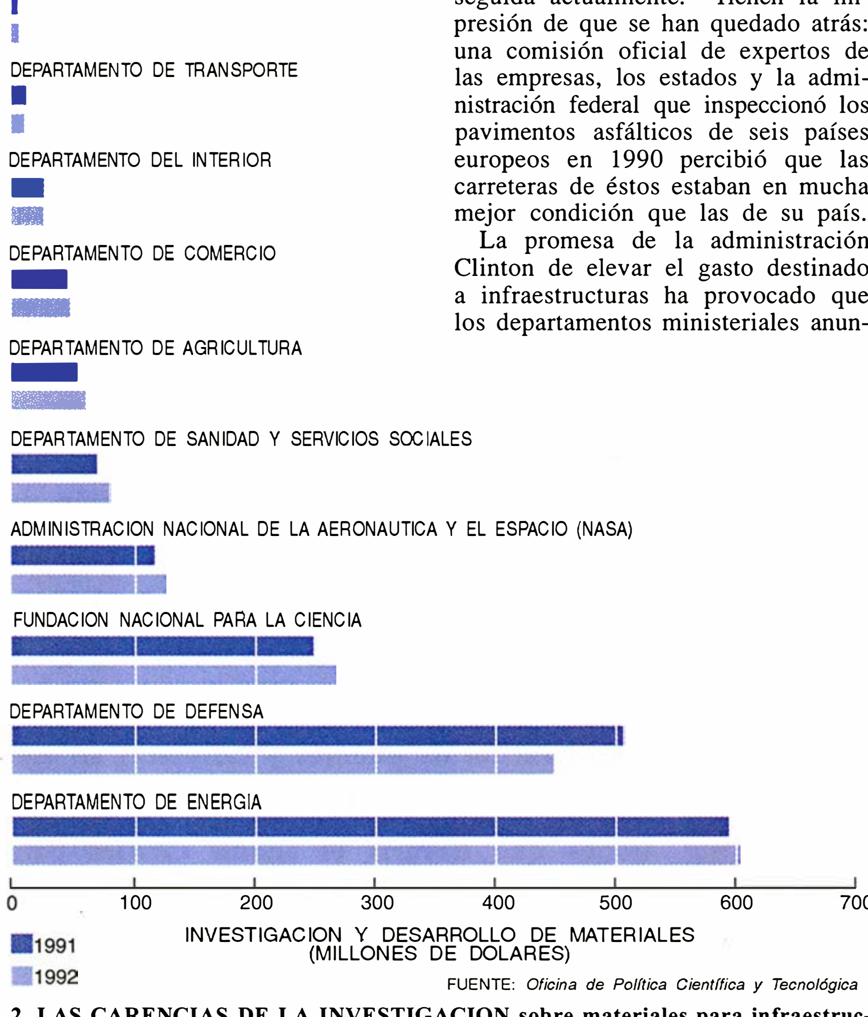
Además, la introducción de nuevos materiales tropieza en los Estados Unidos con la temible barrera que alzan las restrictivas reglamentaciones locales de la construcción, que con demasiada frecuencia especifican muy concretas y convencionales variedades de hormigones, aceros y asfaltos. "Los ingenieros civiles, dice Lyle H. Schwartz, director del laboratorio de ciencia e ingeniería de materiales del NIST, han de trabajar sujetos a códigos desfasados; para justificar la inversión en cualquier nuevo programa de infraestructura tenemos que contar con materiales que nos garanticen una duración doble que la conseguida actualmente." Tienen la impresión de que se han quedado atrás: una comisión oficial de expertos de las empresas, los estados y la administración federal que inspeccionó los pavimentos asfálticos de seis países europeos en 1990 percibió que las carreteras de éstos estaban en mucha mejor condición que las de su país.

La promesa de la administración Clinton de elevar el gasto destinado a infraestructuras ha provocado que los departamentos ministeriales anuncien planes encaminados a llevar las nuevas técnicas de los laboratorios a las obras. Destaca una propuesta conjunta del NIST, la FHWA y la Fundación de Investigación en Ingeniería Civil en la que solicitan al gobierno y a la industria la inversión de 4000 millones de dólares a lo largo de diez años en una serie de proyectos en los que se utilizarían productos avanzados tales como hormigones, aceros y materiales compuestos (*composites*), y se recogerían datos sobre su comportamiento a largo plazo con miras a vencer la resistencia que hay a recogerlos en los códigos de construcción.

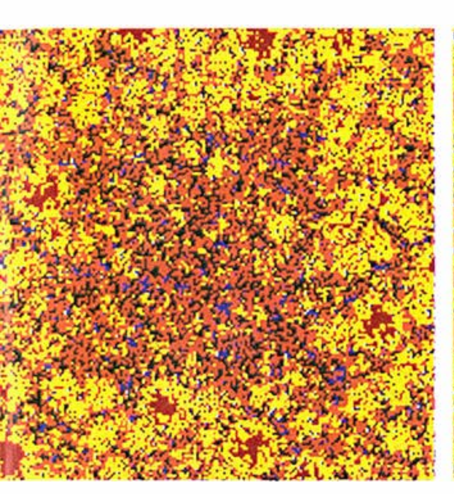
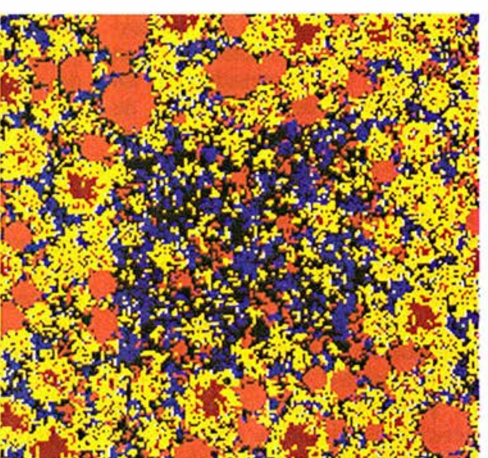
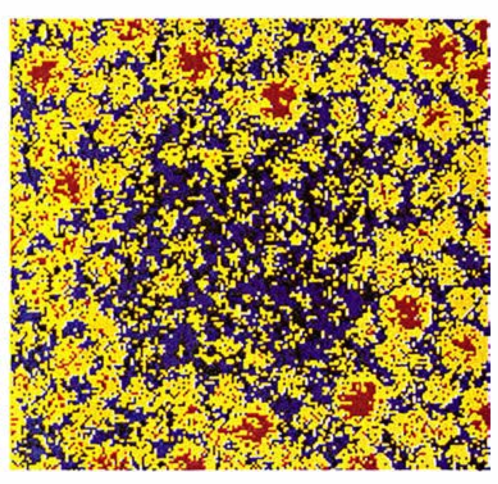
Estos proyectos serán bien acogidos por el pequeño grupo de expertos que se han empeñado en volver a los fundamentos y, hasta ahora, han tenido que vérselas y deseárselas para convencer a quienes aportan el dinero de que vale la pena investigar con métodos modernísimos sobre materiales parecidos a los utilizados por los romanos en sus acueductos. J. Francis Young, profesor de ciencia de materiales e ingenieria civil de la Universidad de Illinois, recuerda el día de 1988 en que recibió una llamada de Surendra F. Shah, profesor de ingenieria civil de la Universidad del Noroeste. Shah quería saber si Young estaba interesado en unirse a una propuesta que la Universidad del Noroeste, el NIST y algunas instituciones más hacían a la Fundación Nacional para la Ciencia (NSF). El objeto de la propuesta era que uno de sus nuevos centros se dedicase al estudio del cemento. "Me pareció", dice Young, "que había tantas posibilidades de que prosperase como de ganar a la lotería."



3. LAS SIMULACIONES efectuadas en el supercomputador Cray-2 muestran la reacción con el agua de las partículas de cemento del hormigón y su crecimiento en presencia de diferentes aditivos mine-



2. LAS CARENCIAS DE LA INVESTIGACION sobre materiales para infraestructuras en los EE.UU. quedan patente cuando se comparan las cantidades asignadas a tal fin por los departamentos encargados de las obras públicas con las que otros departamentos destinan a la investigación de materiales con otros propósitos. Para recuperar tal retraso se ha propuesto un programa de estudio dotado con 2000 a 4000 millones de dólares.

rales. La zona rectangular que se aprecia en el centro de cada imagen representa el espacio situado frente a una partícula de arena. Al añadir humo de sílice (*primera por la izquierda*), las partículas de silicato de calcio hidratado (*píxeles amarillos y marrones*) se apretujan en torno al grano de arena. Que el contenido de agua (*píxeles negros*) sea más bajo revela la menor porosidad del material y, por ende, su mayor resistencia. El cemento sin aditivos produce un hormigón de porosidad más alta, indicada por el mayor número de puntos negros (*última a la derecha*).

Era sólo una propuesta más entre 350, y en la NSF les chocó su mera existencia. A evaluadores de fuera de la institución, sin embargo, les gustó la idea de juntar a físicos, químicos, geólogos e ingenieros para que desentrañasen la química del material. Hoy, simulaciones en pantalla muestran qué ocurre cuando los silicatos y aluminatos de calcio reaccionan con agua: es un gran paso hacia un cemento, con sus más de dos mil años a cuestas, de alta tecnología.

Tarjetas de cemento

Young tiene tarjetas de visita del Centro para Tecnología de Materiales de Cemento Avanzados (ACBM) de la NSF hechas de un cemento tal que se pueden flexionar con la mano y guardar en una billetera.

Desde hace unos veinte años asistimos a un renacimiento del cemento y el hormigón. Se ha multiplicado al menos por cuatro la resistencia a la compresión del hormigón que se utiliza en la construcción, cuyo valor antes, relativamente bajo, era de 300 kilogramos por centímetro cuadrado o menos. También se ha ampliado el recetario de elaboración: se han obtenido hormigones que fraguan más aprisa y son más dúctiles y flexibles que los preparados con el material corriente, el denominado cemento portland. Muchos de estos productos se han aplicado ya a la construcción. En 1989, por ejemplo, el Ministerio de Obras Públicas francés construyó, en las cercanías de Joigny, un puente de más de 100 metros de longitud con hormigón de alta resistencia. El 5 a 10 % de incremento en el precio del hormigón fue sobradamente compensado por el ahorro de un 30 % de material en columnas, planchas y otras estructuras.

A pesar de todo, los ingenieros estadounidenses se muestran cautos. Les preocupa la incertidumbre existente acerca de cuál será la resistencia de unos materiales de menor grosor sometidos al paso de grandes camiones con remolque y al azote de las inundaciones primaverales durante decenios. En el ACBM quieren asegurarse de que el hormigón superará la prueba del tiempo; concretamente, quieren saber el efecto que las variaciones de la estructura porosa —a la que el cemento debe su carácter quebradizo— tienen en la vida útil de un cruce elevado de vía férrea o de una rampa de cambio de dirección en un nudo de autopistas.

Young vaticina que algún día se plantará una serie de sondas en el hormigón en proceso de fraguado para medir sus propiedades acústicas, eléctricas y térmicas, y que los datos obtenidos se enviarán a un ordenador remoto donde se compararán con los modelos que actualmente se elaboran en ordenadores —incluso en supercomputadores Cray—. De esa forma las mediciones podrán convertirse en predicciones bastante precisas sobre su rigidez, resistencia y durabilidad.

La posibilidad de predecir el comportamiento de los materiales puede hacer que los contratistas, en opinión de Young, se presten a garantizar la calidad de su trabajo. Este modo de actuar es ya muy común en Europa, y es una de las razones de la superior calidad de las carreteras en el viejo continente. "Si con esta técnica se pueden garantizar veinte años más de vida, la comprarán", dice Young.

Además de la formulación de complejos modelos en supercomputadores, el ABCM espera ampliar el margen de prestaciones del cemento y el hormigón. Con la colaboración de un científico chino, Young construyó a partir de humo de sílice pequeñas muestras capaces de resistir esfuerzos de compresión enormes, de 7000 kilogramos por centímetro cuadrado, el doble que algunos aceros y del mismo orden que las cerámicas estructurales. La muestra tuvo que sufrir repetidas compactaciones a presiones elevadas, al tiempo que era curada a temperaturas de hasta 200 grados Celsius. Como puede comprenderse, por ahora no será fácil trasladar este experimento a las vías públicas.

Sin embargo, el hormigón de alta resistencia no se ve menos afectado por la fragilidad del cemento. Por ella no se usa éste en piezas de máquinas. La Universidad del Noroeste y algunas más estudian el modo de aumentar drásticamente su ductilidad. Su tendencia a la fractura puede reducirse añadiéndole fibras de vidrio, carbono o acero que impidan el avance de las posibles grietas.

Ya hay en el mercado cementos con un 0,5 % de fibra, y Shah ha producido y probado una pasta que llega de un 10 a 15 %. La ductilidad de este nuevo material multiplica por mil la del cemento convencional y quintuplica su resistencia a la tracción. Siguiendo esa línea de trabajo, podría llegar a conseguirse un hormigón que se tendiera en largas tiras y no en secciones separadas por junturas, lo cual evitaría las fracturas que a menudo se producen en los intersticios. En un terremoto, un poste de ese hormigón se curvaría en lugar de retorcerse totalmente.

Traqueteos, rodaduras, desmenuzamientos

Pero no sólo los seísmos mueven la tierra. A mediados de los años ochenta se calculó que las carreteras de los Estados Unidos tenían 56 millones de baches —uno por cada cuatro habitantes del país—, causados por las extremas variaciones de temperatura y humedad o por las cargas de hasta 10.000 kilogramos por eje que miles de veces al día tienen que padecer sus pavimentos, esas mezclas endurecidas de asfalto y gravas aglutinadas con los espesos y pegajosos grumos que quedan en el crudo de petróleo una vez refinadas las gasolinas y los querosenos.

Los baches son un tábano del que la sociedad no se libra. En 1978 el Congreso deliberó sobre una partida de 250 millones de dolares destinada al problema de los baches, que finalmente no prosperó. Quizá no haya más consumado ejemplo de adaptación de las técnicas militares a un uso civil que el contenido en un folleto del Arma de Ingenieros, de principios de los ochenta. En él se dice cuál es la mejor manera de rellenar un bache: vaciarlo y revestirlo con un material apropiado antes de rellenarlo con asfalto. El año pasado, el director de investigación del Arma compareció ante el Congreso y explicó que esa técnica procedía de los métodos que usaban para reparar pistas bombardeadas. "No se trata del mismo problema, pero hay efectos sinergéticos relacionados con él", les dijo a los congresistas. Hablaba muy en serio.

El Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP) es un plan quinquenal recientemente finalizado, en el que se han invertido 150 millones de dólares, y que ha constituido el mayor ataque desencadenado hasta la fecha contra baches, socavones y otros innumerables daños infligidos a los pavimentos —el manual de identificación de perturbaciones del firme describe en sus 74 páginas los pavimentos con un léxico no pequeño: la carretera puede padecer dilataciones, abombamientos, fracturas, desmenuzamientos o ser causa de traqueteos—. El SHRP ha movilizado a más de 200 ingenieros y científicos, y puesto a su disposición un tercio de los fondos totales, para que realicen el estudio más detallado posible de las propiedades físicas y químicas del asfalto. En él se han utilizado desde la toma de imágenes por resonancia magnética hasta la cromatografía por intercambio iónico. El asfalto, menos duradero pero más barato que el hormigón, cubre el 90 % de las carreteras pavimentadas de los Estados Unidos, y ha celebrado recientemente su centenario en el país con profusión de surcos e irregularidades. En parte, estos

El hormigón

Hace unos veinte años, en la *Fédération Internationale de la Précontrainte* se creó un grupo de trabajo sobre hormigones avanzados con la finalidad de conseguir hormigones de mejores cualidades mediante el empleo de nuevos cementos, componentes y tecnologías, así como de materiales de otro tipo, por ejemplo fibras y polímeros. Pronto los integrantes de aquel grupo tornamos nuestras dudas iniciales en fundadas esperanzas, especialmente ilusionados los europeos que tomábamos parte en la investigación. La semilla arraigó, y fruto de ello fueron los hormigones impregnados con polímeros, en los cuales se introducía en la red capilar del hormigón un monómero (metacrilato de metilo) que después se hacía polimerizar. Con estos hormigones pudimos lograr en España, así como en Italia y Alemania, algo que era impensable sólo algunos años atrás: los 2000 kilogramos por centímetro cuadrado de resistencia.

Más tarde se pensó en reforzar el hormigón incorporándole fibras de acero, idea no rigurosamente nueva pues ya existían desde la antigüedad materiales con tenacidad y resistencia a la tracción acrecentadas por la adición de fibras vegetales u orgánicas. Con las fibras de acero empezaron a eliminarse algunos de los puntos débiles del hormigón: fueron notables las mejoras conseguidas en la resistencia a tracción y a flexotracción, en el comportamiento frente a la fatiga y el impacto, la tenacidad y la ductilidad. Con idéntico propósito se utilizaron después las fibras plásticas, de carbono y de otras sustancias.

El desarrollo del hormigón entró en una nueva fase con la aparición de los superfluidificantes, ya que éstos permitían conseguir hormigones muy trabajables, cuyo amasado requería una cantidad de agua mucho menor. A partir de este momento, el agua —elemento imprescindible en la hidratación del cemento— empezó a centrarse en su papel fundamental, dejando a un lado el de actuar como lubrificante para conseguir masas trabajables, ya que esto tenía efectos secundarios que repercutían muy negativamente en las propiedades del hormigón.

Hace ya tiempo que se conocen los ventajosos resultados de emplear, en hormigones expuestos a entornos agresivos, cementos que contengan ciertos subproductos activos, tales como las escorias procedentes de horno alto o las cenizas volantes recogidas en los filtros electrostáticos de centrales térmicas que queman determinados carbones. Ultimamente apareció en escena un nuevo subproducto: la microsílice o humo de sílice, un polvo esferoidal de una gran riqueza en sílice activa que se recoge en los hornos eléctricos donde se produce silicio y ferrosilicio a partir de cuarzo, caliza y hierro. Este nuevo componente ha desempeñado un papel muy notable en el desarrollo de los hormigones de alta resistencia y alta durabilidad, y hoy día se le utiliza, junto con los superfluidificantes, en los hormigones que forman la estructura de los rascacielos, de los puentes pretensados de grandes luces, de las plataformas petrolíferas del mar del Norte, o en la construcción de las dovelas que cierran la envuelta de los grandes túneles submarinos intercontinentales.

El empleo del hormigón siempre ha contado con una gran tradición en España. Si el ingeniero francés Freyssinet introdujo grandes innovaciones tecnológicas, especialmente la del pretensado, no quedaron atrás el italiano Nervi ni el propio Torroja, quien emplea por primera vez el descimbrado de cúpulas por zunchado perimetral, las armaduras autoportantes y el hormigonado por anillos. Por otra parte, a los ingenieros Torroja y Páez se les debe el haber acuñado en 1956 el concepto de resistencia característica, más tarde adoptado como doctrina oficial en toda Europa.

También España ha contribuido notablemente a esa investigación, tal vez por el hecho de poseer una industria cementera muy potente, que llegó a convertir a nuestro país, años atrás, en el primer exportador de cemento del mundo gracias a su competitividad en calidad y precios. El gran desarrollo de las obras de hormigón se inició aquí, al igual que en el resto de Europa, al finalizar la segunda guerra mundial. Muchas de las presas construidas entre los años cincuenta y setenta son verdaderos alardes de ingeniería por su altura y elegancia. Posteriormente se dio un fuerte impulso a la construcción de puentes y carreteras.

La primera carretera con firme de hormigón construida con máquina de encofrados deslizantes se realizó en la variante de Torrejón de Ardoz, de la autovía A-2 Madrid-Barcelona, en las cercanías de Madrid. Esa carretera, con

defectos pueden achacarse a las dificultades de abastecimiento de crudos padecidas en los últimos tiempos, ya que la calidad del asfalto depende mucho del tipo de petróleo originario: no da igual obtenerlo de un crudo de Venezuela que de uno de Alaska, en opinión de Damian J. Kulash, director ejecutivo del SHRP.

La Universidad estatal de Pensilvania estudió la variabilidad de la rigidez del asfalto con el clima por medio de varios modelos físicos. El SHRP los ha empleado para elaborar especificaciones dirigidas a las refinerías, a fin de que los asfaltos obtenidos tengan la firmeza que exigen climas tan dispares como los de Alaska y Florida.

Se ha tratado también de simplificar las mediciones de la rigidez del material asfáltico y de sus características de flujo, es decir, su reología. En lugar de la imprecisa práctica común de introducir agujas en el material para evaluar su consistencia y determinar si será buena su compactación, la nueva técnica permitirá la obtención de una medida graduada de la duración y calidad de un determinado asfalto en diferentes condiciones climáticas y de tráfico, tarea imposible con simples instrumentos de penetración. "Ahora nos limitamos a un sí o no", dice Kulash; "quien haga un material que aguante la humedad y dure cinco veces más recibirá lo mismo que quien se limite a cumplir la norma."

El SHRP ha iniciado la primera tanda de unas pruebas de pavimentos que, a lo largo de 20 años, cubrirán la nación entera. Asimismo, mediante contrato con la Universidad del Noroeste, se ha construido el "holebot", una especie de pico y la pala del siglo que viene diseñada por James R. Blaha y otros en dicho centro superior. Es un ingenioso vehículo robot reparador de baches, que alisa los bordes del hoyo, lo vacía de materiales sueltos, seca y calienta su superficie, y lanza en su interior el parche con tal fuerza que no se necesita compactación posterior. Quizá no sea muy aceptado el "holebot".. Pasko, del FHWA, dice que "si cambias dos tipos que ganan 20.000 dólares cada uno por uno que gana 50.000, no ahorras nada; pero si no probamos nuevas técnicas, dentro de veinte años seguiremos reparando las cosas como ahora."

A pesar de todo, los objetivos del SHRP no eran lo suficientemente amplios como para satisfacer a ciertos sectores críticos. Así, Fred Moavenzadeh, profesor de ingeniería civil y medioambiental en el Instituto de Tecnología de Massachussets, afirmaba a mediados de los ochenta que la investigación sobre asfaltos sólo podía aportar ligeras mejoras a la tecnología actual, y recomendaba acudir a la investigación aeroespacial

en España

dos carriles en cada sentido, cumple en este año sus veinticinco años de vida muy activa, sometida a temperaturas que oscilan de 45 °C a –10 °C a lo largo del año, con variaciones de 20 °C en un solo día. El tráfico que soporta la variante de Torrejón es muy intenso, en torno a los 85.000 vehículos diarios, entre los cuales hay 6000 camiones circulando en cada sentido. Téngase además en cuenta que en España se permite una carga de 13 toneladas por eje en camiones, y de 21 toneladas por tándem de ejes, cargas que figuran entre las más altas del mundo. Pese a todo ello, al tiempo transcurrido y a la práctica carencia de mantenimiento, la carretera se encuentra en perfecto estado. Las razones de esta notable prestación habría que buscarlas en el cuidado puesto en la ejecución de la obra. Con losas de seis metros de longitud y 25 centímetros de espesor uniforme unidas por pasadores de acero, el hormigón utilizado presentaba una resistencia a la compresión de 330 kilogramos por centímetro cuadrado a 28 días.

A esta carretera han seguido en los últimos años miles de kilómetros de autovías de hormigón, y actualmente prosigue la ejecución de nuevos proyectos basados en firmes de hormigón.

A pesar de que España no tiene ríos importantes que obliguen a grandes luces, se han construido puentes de hormigón importantes por su diseño y ejecución. Ejemplos recientes son los que proporcionaban acceso a la Expo-92 en Sevilla, y, con especial relieve por lo que a la calidad de su material respecta, las pasarelas de hormigón pretensado construidas en Barcelona con motivo de los Juegos Olímpicos, en hormigón capaz de soportar 800 kilogramos por centímetro cuadrado.

Estas dos pasarelas peatonales tienen una luz reducida, de sólo 32 metros; su anchura es de 7,30 metros y su sección transversal tiene forma de T invertida de alas anchas, siendo el alma de la T la viga pretensada. En su construcción se ha empleado, por vez primera en España, un hormigón fabricado en central de resistencia tan elevada, y ello creó problemas a la hora de poner a punto todo un proceso de fabricación que salía de los cauces normales, dado que las centrales están familiarizadas con hormigones de unos 250 kilogramos por centímetro cuadrado y el paso a los 800 les suponía enfrentarse a un mundo totalmente nuevo. Aceptaron, sin embargo, el reto y consiguieron finalmente un hormigón muy fluido y fácil de colocar en una viga con gran densidad de armadura.

Pasarela de hormigón de alta resistencia construida en Barcelona con motivo de los Juegos Olímpicos de 1992.

Lo que más preocupa actualmente a los ingenieros españoles es la durabilidad de las estructuras. En los últimos tiempos se observa un progreso en la calidad de los hormigones obtenidos; se desarrollan nuevas normas, se reforman y completan las instrucciones de cemento y hormigón existentes, y se incrementan las resistencias de cálculo con miras a conseguir al mismo tiempo un incremento en la durabilidad. (Manuel Fernández Cánovas, catedrático de materiales de construcción de la Universidad Politécnica de Madrid).

y militar como fuente de ideas para materiales de construcción civil.

En busca de nuevos materiales

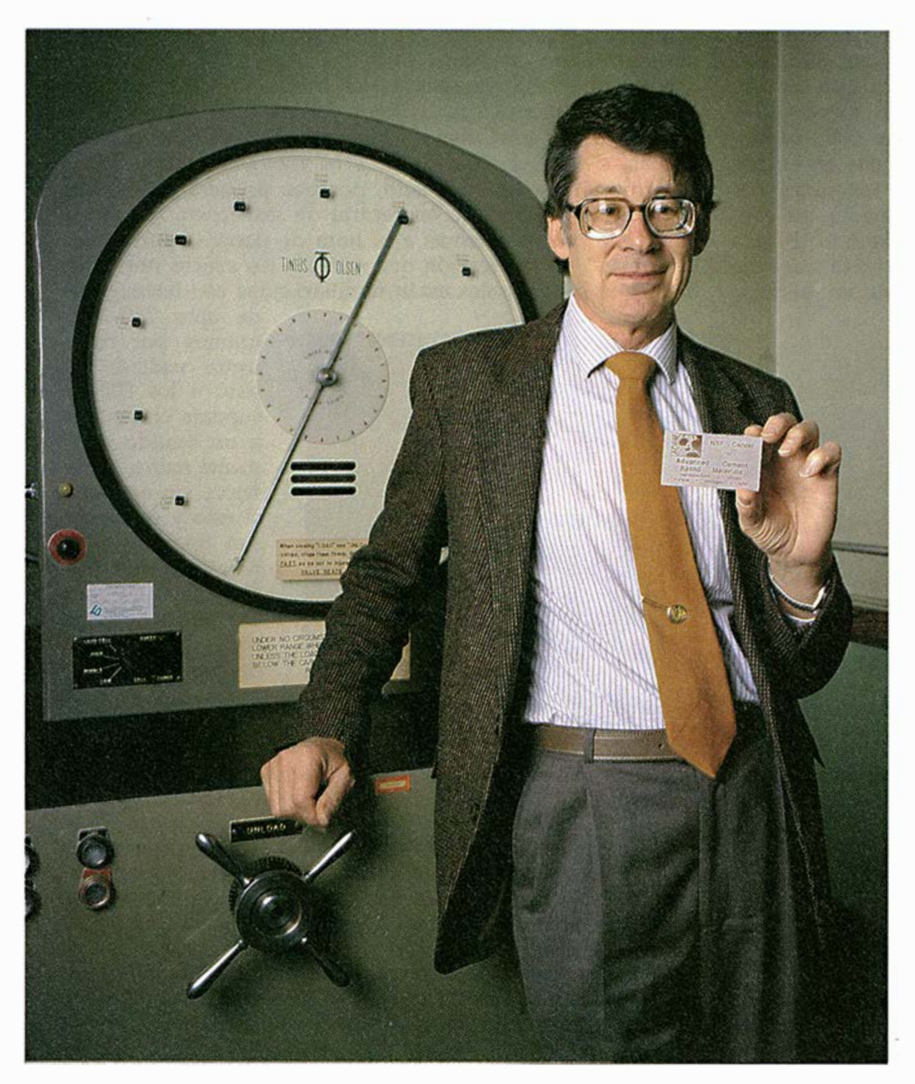
Puede sorprender la combinación de mundos tan distantes como el de la industria aeroespacial y el de las obras públicas. Las muestras de laboratorio de compuestos de matriz metálica pueden valer miles de dólares por kilogramo, mientras que el costo de un kilogramo de hormigón no pasa de algunos centavos, y, al peso, es más barato que el chicle. Moavenzadeh cree que el argumento es tendencioso: "El coste de los materiales podrá reducirse, pues los requisitos de una infraestructura son menos exigentes que los de una nave espacial, y el gasto en materiales sólo es una mínima parte de lo que cuesta mantener la estructura a lo largo de toda su vida útil".

Si se llega a superar el problema del coste, los materiales compuestos ofrecerán una serie de ventajas para la rehabilitación o sustitución de los 200.000 puentes, más o menos, que presentan deficiencias en Estados Unidos. Los compuestos satisfarían los sueños de los ingenieros que entraron en su profesión movidos por lo mucho que se divertían de pequeños con los juegos de construcciones. Un puente de plástico reforzado se podría ensamblar y pegar con cola; un camión podría transportar trozos de calzada que no pesasen sino la quinta parte de una estructura de hormigón, que se colocarían en una sola noche.

Varios proyectos de colaboración entre empresas y gobierno intentarán traer a sí el dinero que la Administración Clinton ha prometido desviar de la defensa a fines civiles. La McDonnell Douglas Aerospace, la división de la McDonnell Douglas que construye el avión de combate AV-8B, cuyo fuselaje y alas son enteramente de materiales compuestos, acaba de incorporarse a un consorcio de empresas y grupos de investigación que se ha propuesto construir puentes con polímeros orgánicos semejantes a los empleados en aviones militares; en él están la Universidad de Washington y varias compañías del área de St. Louis.

También se está experimentando un pilar para puentes hecho de un material compuesto, fibras de carbono en resina epoxi, con el que se haría una coraza dentro de la cual se vertería el hormigón. Este diseño evitaría el tener que reforzar el hormigón con barras de acero, atacables por la corrosión. Puede variarse el número de fibras y su orientación en el seno del material de suerte que éste resista el esfuerzo de cizalladura producido por los terremotos. Zoltek, proveedor de fibras de carbono de la McDonnell Douglas, desarrolla un proceso de fabricación de un millón de fibras por vez, que reduciría su precio de 20 a 5 dólares por libra (0,45 kilos). En teoría, el consorcio es un intento de conversión de una industria militar en civil, pero requerirá una ayuda federal (del departamento de defensa especialmente) de no menos de 20 millones de dólares para ponerse en marcha.

Otro proyecto que podría nacer de la cooperación con la industria aeroespacial es el del puente de material compuesto más ambicioso hasta la fecha. La Universidad de California en San Diego ha recibido 1,6 millones de dólares para que proyecte la construcción de un puente de compuesto que uniría dos partes del complejo universitario que están separadas por la interestatal 5. Dicho puente, suspendido de tirantes de cable, mediría unos 140 metros de longitud, y por él podrían circular camiones de gran tonelaje. Su construcción costaría unos 50 millones de dólares, que, dice Gilbert A. Hegemier, profesor de mecánica aplicada, habrían de servir además para probar técnicas de fabricación que asemejasen la construcción real a los juegos de construcciones. "Los métodos de ensamblaje manuales que se emplean en la fabricación de los compuestos del avión Stealth han de ser automatizados", señala. Pero las negociaciones para formar un consorcio con algunas compañías aeroespaciales aún no especificadas tropieza con problemas tocantes a los derechos de propiedad intelectual y a las responsabilidades legales. "Hasta ahora no ha habido un puente que tenga que soportar tráfico en el que se hayan empleado compuestos", dice con preocupación Frieder Sei-



4. TARJETA DE CEMENTO. La exhibe J. Francis Young, de la Universidad de Illinois. Cabe perfectamente en una billetera.



5. EL "HOLEBOT", camión reparador de baches robotizado, fue construido en la Universidad del Noroeste por James R. Blaha (*derecha*), Ralph Salle y otros. Este camión, capaz de rellenar automáticamente un bache en menos de 10 minutos, podría costar en el mercado entre 300.000 y 400.000 dólares.

ble, profesor de estructuras. "¿Y si el puente se cae? ¿Quién es el responsable cuando se desarrollan sistemas y materiales nuevos?".

Estos proyectos están aún sólo en el tablero de dibujo, pero hace ya un año que se construyó un puente peatonal sobre el río Tay en Aberfeldy, Escocia, supervisado por una firma británica de ingeniería civil que quería con ello mostrar un diseño y una fabricación más sistemáticos de estructuras de material compuesto. Maunsell Structural Plastics, de Beckenham, sostiene que el coste es competitivo con el de las estructuras de hormigón y acero.

La fabricación, obra de GEC Reinforced Plastics a partir del diseño de la Maunsell, consistió en ensamblar 400 metros cuadrados de paneles de plástico huecos aglutinados con cemento epoxi para formar vigas en caja. Estos paneles se construyeron haciendo pasar fibras de vidrio a través de un recinto cúbico en el que se había inyectado una resina de poliéster catalizado. El montaje, por fin, fue realizado en dos semanas por alumnos de la Universidad de Dundee; ensamblaron y encolaron el tablero del puente (60 metros de longitud), que se asienta sobre dos torres de estructura en A, sobre el terreno.

El director técnico de Maunsell asegura que el puente de Aberfeldy, que ha costado más de 4 millones de pesetas, es un diez por ciento más barato que un puente corriente. Pero no todos creen que estas nuevas estructuras aventajen en términos económicos a las de hormigón; la verdad es que los materiales compuestos orgánicos pueden ser entre 50 y 1000 veces más caros. Por otra parte, falta una base industrial de donde puedan surgir los futuros constructores de puentes de plástico. Hota V. S. GangaRao, profesor de ingeniería civil de la Universidad de Virginia Occidental, está convencido de que "en diez años podrán hacerse estructuras de compuestos más baratas".

Aunque los compuestos orgánicos no sufran corrosión como el acero, todavía no se ha probado su duración en condiciones reales; es posible que la vida útil de una estructura se vea afectada por los constantes cambios de temperatura, humedad, carga de vehículos y esfuerzos en las uniones de los paneles componentes. "El puente de Brooklyn lleva ahí cien años. Cuesta atreverse a decir que los compuestos durarán tanto", afirma Joseph M. Plenik , profesor de ingeniería civil de la Universidad de California en Long Beach.

Sin embargo, otras técnicas también desarrolladas en el sector aeroespacial quizás alivien la incertidumbre que rodea a los compuestos mediante la detección precoz de fallos con dispositivos sensores muy refinados, cuyo diseño se basa en lo aprendido gracias a técnicas originalmente concebidas para la aeronáutica. La capacidad de sondear las deformaciones producidas en tablas y pilares de puentes permite dar aviso de los daños o fallos ocurridos. El Instituto de Estudios Aeroespaciales de la Universidad de Toronto proyecta instalar medidores de deformación ópticos repartidos por toda una columna o entramado de material compuesto, y conectarlos mediante una red de fibra óptica de modo tal que cualquier esfuerzo aplicado a los sensores produzca un cambio de longitud de onda capaz de ser detectado por instrumentos optoelectrónicos.

Visión interior

Las redes de sensores interconectados por fibras ópticas, como si fuesen nervios, son ya un anticipo de los edificios y puentes "con consciencia de sí". Como ejemplo, la Universidad de Vermont acaba de instalar 4 kilómetros de cableado óptico por el interior de muros, techos y pilastras de hormigón de un nuevo centro de investigaciones médicas, con el fin de poder detectar movimientos muy leves en los mismos y de señalar, por medio de sensores ópticos, si se están formando grietas. El edificio está, además, equipado con los medidores de deformación eléctricos y sensores de aceleración corrientes. Associated Press, no sin hipérbole, ha llamado a este edificio "el más inteligente del mundo".

Los más de once millones de dólares invertidos servirán para experimentar cómo se observa un edificio a sí mismo. No va a desalojarse un edificio por la detección de una grieta de dimensiones capilares. Pero Peter L. Fuhr, que fuera investigador de la NASA, donde trabajó en un sistema de comunicaciones vía satélite por láser hasta que lo contrató la Universidad de Vermont en 1985, y Driver R. Huston, profesor de ingeniería mecánica, comienzan a cribar la interpretación de los signos vitales del edificio. "Casi todos los datos son pura filfa, así que intentamos distinguir lo que sí tenga importancia", dice Fuhr, quien cree que los sensores tienen su mejor aplicación en muros de presas y en zonas de actividad sísmica, sometidas a gran-



6. PUENTE SOBRE EL RIO TAY, construido el año pasado en Aberfeldy (Escocia)con materiales compuestos que refuerzan fibras de vidrio. El tablero, cuyos componentes van encolados (*abajo a la zquierda*), fue levantado hasta encajarlo entre las dos torres de estructura en A.

des variaciones de esfuerzos. Huston y él ayudaron el pasado año a instalar 7 kilómetros de cable de fibra óptica en una presa del río Winooski, con el objeto de que con él se supervisase la presión del agua sobre el dique, el flujo de agua a través del aliviadero y las vibraciones causadas por las turbinas. El sistema de vigilancia informatizado inspecciona automáticamente la estructura varias veces al día, y emite llamadas de emergencia en caso de que sea necesario.

También los puentes y las carreteras pueden responder al mundo que les rodea. El envío de un impulso eléctrico por un cable coaxial instalado en el interior de un pilar de un puente —e incluso el envío de corriente a través de las barras reforzadoras de acero—, y la medición del tiempo que tarda esa señal en regresar a un receptor, permitirían, según una idea que estudia el centro de materiales inteligentes para sistemas y estructuras del Tecnológico de California, detectar daños internos. Los pavimentos inteligentes han sido investigados por el centro de ciencia y tecnología de la Westinghouse, de Pittsburgh: se aplica un débil campo electromagnético a un asfalto en el que se han sembrado partículas ferromagnéticas a fin de medir su espesor o de descubrir espacios huecos en la superficie endurecida.

Los trabajos del laboratorio de materiales arquitectónicos de la Universidad de Illinois han sugerido la idea del puente que se cura a sí mismo. Carolyn Dry, profesora de arquitectura, experimenta un material formado por fibras de vidrio o de polímero embebidas en mortero de cemento. Si un pilar de puente construido con ese tipo de hormigón sufriera una grieta o fisura como consecuencia de un terremoto u otros esfuerzos, la fibra hueca se partiría y desprendería un adhesivo que atajaría el avance de la fractura. Según otro método, un revestimiento de fibras de polipropileno sería eliminado por sales anticongelantes, y se liberaría una sustancia anticorrosiva que protegería las varillas metálicas reforzadoras.

No obstante, pese a todas las investigaciones en curso, en los Estados Unidos se siguen practicando abrumadoramente métodos de conservación de vías y puentes muy tradicionales.

Las barreras institucionales

Lo que más impresionó al ingeniero Wayne Muri, presidente de la asociación americana de responsables estatales de carreteras y transportes, durante su visita a Europa como miembro de la comisión que examinó las carreteras europeas en 1990 y tan buena impresión se llevó de ellas, fue un tipo de asfalto desarrollado en Alemania para aguantar el daño causado por las ruedas con cubiertas de clavos. Es altamente resistente a la formación de rodadas por el paso de camiones muy cargados, importante causa de deterioro de carreteras. El material, un amasado de asfalto y piedras, consiste en una red de piedras machacadas, puestas en contacto y aglutinadas por un material asfáltico duro al que se adicionan fibras o polímeros.

Pero la resistencia al cambio viene tanto de las empresas contratadas para las obras como de los representantes públicos que las contratan. El caso norteamericano es un ejemplo de las complejidades del cambio técnico. Es interesante comparar la situación en Estados Unidos y Francia. En aquéllos habrá unas 16.000 empresas dedicadas a pavimentación y rehabilitación de carreteras, muchas de ellas de tipo familiar, las cuales sobreviven gracias a respetar rígidamente los códigos de construcción que durante decenios han regido la especificación de materiales idénticos. Ello contrasta con Francia, donde nueve grandes firmas se encargan del 80 % de las carreteras importantes y, a diferencia de la mayoría de los contratistas norteamericanos, mantienen una plantilla de investigadores en la propia empresa como requisito previo para la incorporación de nuevas tecnologías de materiales. En palabras de Harvey M. Bernstein, presidente de la Fundación de Investigaciones en Ingeniería Civil (CERF), "son muy pocas las compañías estadounidenses que piensan en la investigación y el desarrollo; carecen de personal capacitado para entender tanto aquélla como éste, y se enfrentan sólo con los problemas de cada día".

Con frecuencia, este ambiente disuade a aquellos que podrían traer innovaciones al mercado hasta de intentarlo siquiera. Novophalt America, subsidiaria de una firma austriaca, ha tratado de promocionar un asfalto de alta duración que contiene un aditivo polímero. En un informe de la oficina de Evaluación Tecnológica del Congreso en 1991 consta que Novophalt tropezó con la resistencia de los funcionarios de obras públicas, a pesar de presentar datos positivos de las pruebas realizadas con dicho pavimento sobre autovías y pistas de aeropuerto por toda Norteamérica.

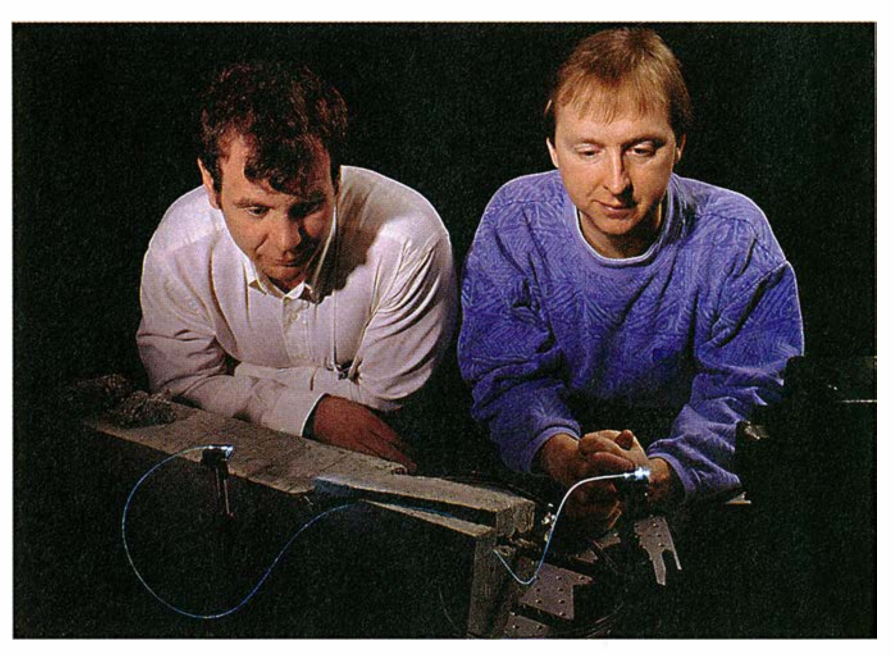
El fracaso no se debe simplemente a la política de comprar sólo productos nacionales. Corning desarrolló un cemento de fraguado rápido y alta resistencia basado en un hidrogranate vítreo, material que tardaba en fraguar de dos a cuatro horas solamente y poseía otras cualidades favorables, como la baja porosidad y escasa reactividad química. Pues bien, como expuso el director de contratos de investigación de Corning en un detallado informe a la CERF, su empresa tropezó con fuertes obstáculos a la hora de introducirse en el mercado de materiales de construcción de autopistas. Señalaba en concreto la aversión al riesgo de las industrias, los elevados costes de garantía, la baja rentabilidad y la falta de familiaridad con las innovaciones, y afirmaba: "no parece que haya un mecanismo para financiar con altos beneficios los saltos tecnológicos".

Esta dificultad de evolución tecnológica en las obras civiles ha movido a la CERF y la FHWA a crear unas instalaciones para el ensayo de nuevos productos. Así, el llamado Centro de Evaluación de Tecnologías Innovadoras para Carreteras proporcionará, a partir del año en curso, una evaluación exhaustiva del comportamiento de los materiales, para orientación de las administraciones estatales en la certificación de productos. Si cumple sus objetivos, ofrecerá a los innovadores un acceso al mercado en una sola y decisiva etapa.

Pero se necesita algo más para hacer realidad los puentes de plástico y las carreteras de masilla de asfalto: gobierno e industria deben gastar cantidades mayores en la investigación de materiales. Actualmente, y pese al incremento conseguido en 1991, la suma total destinada a investigación es sólo el 0,25 % de la invertida en autopistas, apenas la veinteava parte del porcentaje equivalente en la industria aeroespacial.

Se debate mucho acerca de cuánto contribuye a aumentar la productividad la inversión en infraestructura. De lo que no cabe duda es de las consecuencias negativas que tienen las malas carreteras. Muri recuerda que hará unos tres años la oficina del gobernador recibió una factura, no del todo chusca, de la inmensa planta de la General Motors en Wentzille, Missouri, por 50.000 dólares. La razón es que tuvieron que interrumpir su proceso de producción porque unas reparaciones de emergencia emprendidas en la interestatal 70 impidieron que llegaran a tiempo los camiones de suministro.

"Cuando decimos que hay que investigar el hormigón, siempre nos responden que ya se hace", se queja Schwartz, del NIST. "Pero ignoran el enorme potencial de mejora que hay en este campo. Lo que haya que invertir en los 25 años siguientes podría depender de una pequeña inversión en los cinco que vienen."



7. UN SISTEMA NERVIOSO ESTRUCTURAL, consistente en una red de fibras ópticas diseñada por los profesores Huston (*izquierda*) y Fuhr de la Universidad de Vermont, puede detectar la presencia de grietas y fisuras en el hormigón.

Ciencia y empresa

Armas de nuevo tipo

Contra el cáncer

Cuando nos enfrentamos a un adversario aguerrido y feroz, ningún arsenal es lo bastante completo para combatirlo. En la lucha contra el cáncer —mejor dicho, contra las distintas formas de tumores— se ha observado que no existe una única estrategia vencedora. Prevención y diagnóstico precoz constituyen, sin duda, métodos muy válidos, mas de ellos no podemos esperar una mera reducción del riesgo de contraer o desarrollar un tumor. La cirugía y las terapias químicas y radiológicas sí pueden traer la salud al enfermo, pero a costa de sufrimientos y mutilaciones.

La observación de que existen defensas individuales, de diferente magnitud, contra la degeneración maligna de los tejidos ha animado a los investigadores a estudiar el sistema de activación de las defensas endocelulares. Su desarrollo se puede abordar fácilmente en los focos primarios que manifiestan substancias cancerígenas, cuya acción combate. Se ha comprobado que la mayoría de estas substancias cancerígenas presenta una forma de operar característica: se unen al ADN del núcleo celular. Impedir esta unión sería la mejor de las defensas.

Ahondando en esa línea, la investigación ha venido trabajando, desde la segunda mitad de la década de los ochenta, para conseguir el aislamiento de las substancias y esbozar una auténtica quimioprevención contra el cáncer. Los resultados de estos estudios, desarrollados principalmente en el Instituto Oncológico de Milán y en el Instituto del Cáncer de Bethesda, se recogen en un volumen dirigido por Umberto Varonesi, que publicará la neoyorquina Raven Press. En particular, el Instituto del Cáncer ha escogido, a través de un proceso minucioso de sondeo (*screening*), una decena de moléculas de entre un centenar. Se cuentan, entre las seleccionadas, las vitaminas E y A y la N-acetilcisteína (NAC).

En estas dos últimas substancias concentran hoy sus esfuerzos sesenta y tres centros europeos, que se proponen someter a una rigurosa experimentación clínica a 2000 individuos seleccionados en los catorce países europeos participantes en la investigación. El proyecto, bautizado con el nombre de "Euroscan" (siglas en inglés de Estudio Europeo de Quimioprevención con Vitamina A y N-acetilcisteína), comenzó en junio de 1988 y se prevé su conclusión en junio de 1993. El mayor peso de la empresa ha recaído sobre holandeses (12 centros y 544 pacientes) e italianos (16 centros y 470 pacientes) y los resultados no son nada desdeñables, si los comparamos con países que realizan mayores inversiones en la investigación.

¿Por qué se ha seleccionado precisamente la vitamina A y la N-acetilcisteína? Los motivos son semejantes y del mayor interés. Como explicó Ugo Pastorino, del Instituto Oncológico de Milán, a un nutrido grupo de periodistas de la prensa especializada durante la convención Euroscan en París en noviembre pasado, para la vitamina A se disponía de una larga serie de estudios realizados en su Instituto, mientras que sobre la N-acetilcisteína se contaba con amplia y exhaustiva información gracias a las investigaciones de Silvio De Flora, del Instituto de higiene y medicina preventiva de la Universidad de Génova. Además, la N-acetilcisteína es un fármaco mucolítico producido por un laboratorio farmacéutico italiano, Zambon, y muy extendido para el tratamiento de bronquitis en los últimos 20 años. Se conocen, pues, perfectamente su tolerancia y sus eventuales efectos secundarios. El hecho de que la NAC haya demostrado actividad antimutágena y anticancerígena puede deberse a sus propiedades antioxidantes —esto es, su capacidad de destruir radicales libres, característica compartida con las vitaminas A y E y micronutrientes como el selenio— o su participación en el sistema de protección endocelular. La NAC actúa como precursor en la formación del glutatión reducido (GSH), el sistema natural de mantenimiento de la integridad de la célula y sus funciones. Estas propiedades explican su empleo desde hace algunos años como fármaco de emergencia en intoxicaciones por contaminantes, setas y sobredosis de fármacos.

Es obvio que no se puede administrar durante años un fármaco a una población sana para experimentar su eficacia antitumoral. El proyecto Euroscan ha reclutado los pacientes sujetos al ensayo clínico entre individuos operados o tratados por carcinomas pulmonares, laríngicos o de la cavidad oral. Los resultados son más que prometedores, aunque parciales. De 1115 individuos controlados durante diez meses, 960 no han presentado tumores nuevos o distintos. Como ha demostrado N. van Zandwijck, de la compañía Antoni van Leeuwenhoek Ziekenhius de Amsterdam, la NAC puede proteger los pulmones de los daños provocados por la radioterapia torácica, al prevenir los efectos citotóxicos de las radiaciones ionizantes, incluso a altas dosis. Y no sólo eso. En el departamento de bioquímica y biología molecular de la Universidad de Florida, se está experimentando la eficacia de este fármaco en la protección del bulbo pilífero, cuya intensa actividad de crecimiento provoca que esté entre las estructuras más dañadas por la quimioterapia. La alopecia resultante incrementa el estrés de los pacientes afectados.

Diríase que acaban ahí las propiedades de este fármaco quimiopreventivo. Parece que puede enfrentarse a otras enfermedades degenerativas, como la cardiomiopatía o la arterioesclerosis, siempre gracias al mismo mecanismo de protección de los daños moleculares inducidos por substancias como los componentes del humo o el benzopireno. Incluso otras enfermedades víricas asociadas a tumores, así las hepatitis B y C y el SIDA, podrían aprovecharse de un tratamiento de refuerzo con NAC.

Llegados a este punto, puede ser interesante conocer el monto de la financiación europea del proyecto Euroscan, 50 millones al año, realmente pocos si se piensa que, para mantener la industria del tabaco, la financiación ronda el medio billón y uno de cada ocho fumadores empedernidos muere de cáncer.

Otra línea estratégica para combatir de una manera más eficaz los tumores es la que se presentó el pasado noviembre en Roma, en el Instituto Superior de Sanidad. Dos importantes empresas farmacéuticas, la multinacional Bristol-Myers Squibb y la italiana A. Menarini, instalada ésta ya en varios países europeos, han estipulado un acuerdo de colabo-

ración encaminado a la obtención de nuevos fármacos activos contra los tumores resistentes a los actuales fármacos. Esta alianza entre el líder del sector farmacéutico oncológico y la empresa presidida por Francesco Arcamone, descubridor de la adriamicina, el quimioterapéutico más empleado mundialmente, permite esperar la aparición, de aquí a tres o cinco años, de uno o más agentes farmacológicos potenciales, capaces de intervenir en zonas precisas del ADN de las células tumorales sin dañar las sanas, inconveniente en el que cae la quimioterapia actual. En lo que respecta a la experimentación clínica que seguirá a esta fase preliminar se han previsto ya colaboraciones con los principales centros oncológicos italianos, con laboratorios universitarios y del CNR y con el instituto de investigación de la empresa Bristol-Myers Squibb de Princeton. (*Adriana Giannini*).

Luminosa oportunidad

Los polímeros electroluminiscentes dan brillo a una antigua institución

Allá por 1989, Richard H. Friend, físico de la Universidad de Cambridge, trataba de fabricar transistores a partir de polifenilenevinileno (PFV), un polímero orgánico, del que sabía que se asemejaba, por sus propiedades eléctricas, a los semiconductores, y que era un material resistente, ideal para fabricar dispositivos que se basasen en películas delgadas. Lo que no esperaba era que, al aplicar un pequeño voltaje a través de una fina lámina de PFV, ésta emitiera una luz de sorprendente brillo.

Transcurridos más de tres años de trabajo intenso, Friend y sus colaboradores creen haber desarrollado una técnica interesante para la fabricación de pantallas planas. Quieren hacerse con una buena parte del mercado de tubos de rayos catódicos, diodos fotoemisores, tubos fluorescentes, pantallas de cristal líquido y dispositivos similares; han creado para ello una empresa, Cambridge Technologies Displays.

Aunque aún les queda mucha labor de ingeniería por delante, han logrado grandes progresos desde el descubrimiento inicial. El PFV sin modificar sólo emite luz de color amarillo verdoso; sin embargo, Friend, con un grupo en el que figuraba el químico de Cambridge Andrew B. Holmes, ha producido derivados fotoemisores del PFV que abarcan la totalidad del espectro visible. Lo más notable es que hayan conseguido un buen azul, que es el talón de Aquiles de otras técnicas de visualización. "Hasta que no obtuvimos un azul de garantía, pensábamos que sólo podríamos hacer pantallas de dos colores", dice Richard J. Artley, de Generics Group, accionista de Cambridge Display.

Además, el brillo de estas pantallas de PFV puede decuplicar el de una pantalla de televisión, dice Artley. La meta final es realizar pantallas brillantes a todo color, con píxeles de los tres colores primarios, más delgadas que las pantallas de cristal líquido retroiluminadas. Se piensa tambien en aplicar la técnica a luces y señales de emergencia, o a indicadores que hayan de leerse a plena luz del día.

Por si fuera poco, en Cambridge Display afirman que cabe esperar que el rendimiento de los dispositivos PFV sea superior al de las pantallas de cristal líquido retroiluminadas. Afirman que la conversión de potencia a luz ha aumentado en uno y medio el rendimiento; es decir, ha multiplicado por 15 el rendimiento de los primeros dispositivos PFV, de hace tres años. Friend estima que "un rendimiento del diez por ciento sería razonable", una vez se hayan refinado las técnicas de fabricación de manera que se obtengan materiales con un mayor grado de pureza. El rendimiento de los diodos fotoemisores inorgánicos no pasa del 1 %. Es esencial que se elijan bien los materiales que han de constituir los electrodos; por ejemplo, el calcio es muy adecuado, por sus propiedades electrónicas, para uno de los electrodos del PFV.

Tal vez la principal ventaja del PFV, según Artley, sea que su precursor químico se maneja fácilmente en solución. "Puedes hacer que te lo traigan de la otra punta del mundo como si fuera un bote de pintura, aplicarlo sobre un sustrato y calentarlo entonces sólo a 200 grados Celsius." Por el contrario, las pantallas de diodos fotoemisores inorgánicos han de fabricarse en el vacío y a 500 grados, operación mucho más complicada. Dado que el precursor de PFV se pinta sobre una superficie, los elementos de imagen individuales pueden hacerse de todos los tamaños, desde muy pequeños hasta muy grandes. Incluso pueden modificarse ciertas regiones, una vez pintadas, para que emitan un color distinto. El hacer señales bicolores de PFV, aseguran, no sería un gran problema. Y como este polímero es flexible, puede aplicarse sobre superficies curvas o plegables.

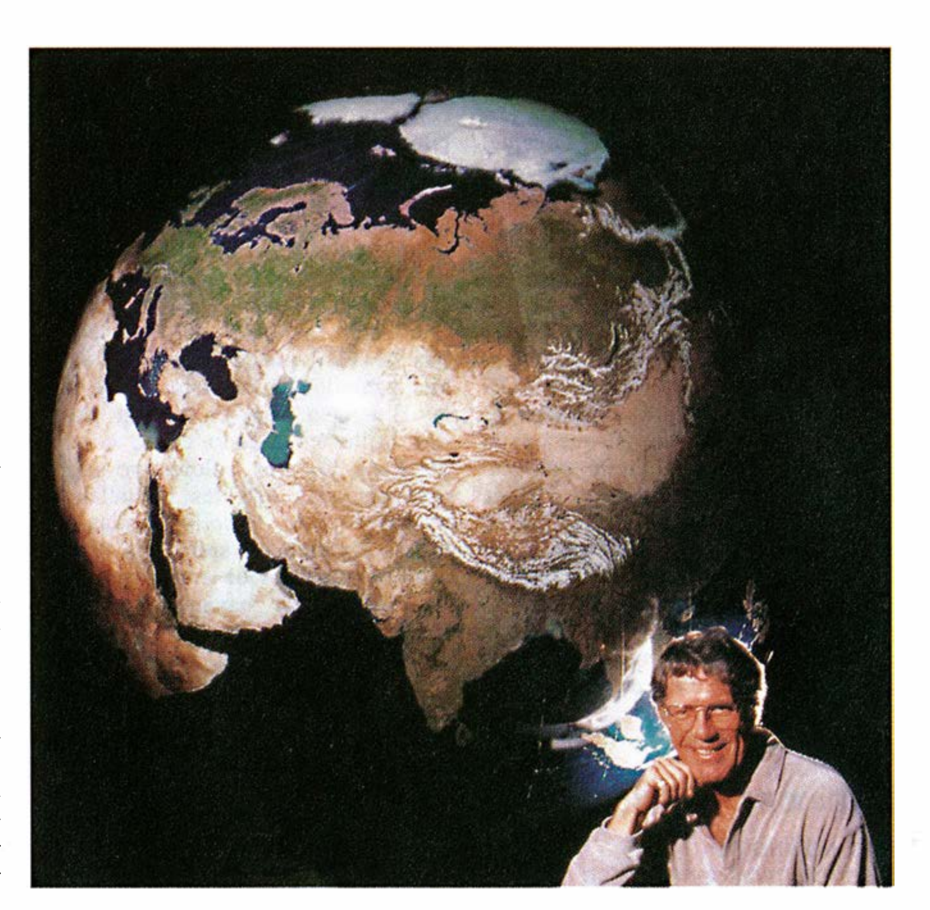
Desde luego, está por ver si los



El polímero luminoso (recuadro) *podría ser la clave de una nueva generación de pantallas para ordenadores, anuncios y otros dispositivos. Richard H. Friend, de la Universidad de Cambridge, descubrió en 1989 las propiedades fotoemisoras del polifenilenevinileno.*

investigadores de Cambridge Display logran llevar al terreno comercial las ventajas naturales del PFV. Todavía se recuerda en Cambridge otro brillante descubrimiento allí realizado —la producción de anticuerpos monoclonales—, que no fue patentado, con lo que perdieron muchos millones en regalías. Friend y sus colaboradores no han cometido, al menos, ese error. Han registrado patentes que cubren cualquier posible uso en pantallas de polímeros semejantes al PFV. Además, la empresa negocia con los magnates norteamericanos y japoneses de la electrónica de consumo la inversión del capital necesario para el desarrollo de una pantalla de polifenilenevinileno en color y de alta resolución.

Pese a las maravillas que se auguran, hasta ahora sólo se han construido pequeños prototipos de dispositivos PFV, a los que, además, no se les ha sometido todavía a pruebas de longevidad, si bien ciertas observaciones informales (las de muestras dejadas en el alféizar de una ventana del laboratorio Cavendish donde trabaja Friend) indican que en condiciones ordinarias son estables; es seguro, dice Artley, que el PFV lo es no menos de 1000 horas, y se sabe que materiales semejantes sobreviven incluso 10.000 horas. No será difícil, espera, llegar a las 100.000 horas (más de un decenio), como se requiere para productos de larga vida. Si esto se cumpliera, el mercado, calcula Artley, podría rebasar los 3 billones de pesetas a precios de 1993. Artley espera que dentro de 18 meses se haya producido un sencillo prototipo de pantalla de PFV. Su brillante luz podrá entonces deslumbrar Cambridge.



Mapa global confeccionado con imágenes de satélites, "el proyecto de representación más avanzado del mundo", según Tom Van Sant, fundador y director de GeoSphere Project.

Panorámica general

Imagen auténtica de la Tierra

Para Tom Van Sant, fundador y jefe ejecutivo de GeoSphere Project, de la californiana Santa Mónica, ver, cuando hemos de entender la complejidad de nuestro entorno global, es creer. "Queremos ser capaces de mostrar a la gente, sin necesidad de traducción, las relaciones de los diferentes sistemas terrestres y su dinámica."

Van Sant transmite su mensaje mediante imágenes de satélite tomadas a gran altura, gráficos de ordenador y un modelo tridimensional de la Tierra. El "globo real", así lo ha bautizado, es una esfera de dos metros de diámetro que presenta la imagen de la Tierra tal y como aparecería desde el espacio si no hubiese nubes. A modo de pantalla tridimensional en el globo se proyectan los fenómenos del cambiante entorno terrestre: las diferentes corrientes oceánicas, la deriva de los continentes, la deforestación tropical, el cambio climático general. La compañía equipa además el globo con luces interiores por fibra óptica, para que los espectadores puedan ver la imagen nocturna de las ciudades del mundo o la actividad sísmica del planeta.

El globo real es el núcleo de lo que los responsables de GeoSphere Project llaman "sala de situación terrestre" (SST). Dado que un individuo sólo puede ver la mitad del globo mire desde el ángulo que mire, la SST contiene también pantallas murales en las que se proyecta la imagen entera de la Tierra, con las superposiciones que se deseen. Los monitores permiten a los usuarios agrandar la imagen y observar en detalle cualquier región de la Tierra. Van Sant vislumbra una red internacional de SST que servirían como bibliotecas visuales de sistemas terrestres para las cadenas regionales de televisión, las escuelas y los centros de investigación; según él, nos hallaríamos ante "el proyecto de representación científica más avanzado del mundo".

La idea va calando. La empresa, a los cuatro años de su existencia, instaló su primera SST en la Exposición Mundial de Sevilla, y ha suscrito contratos para construir siete más este año. GeoSphere, sin embargo, no se limita a vender las SST, cuyo precio asciende a millones de dólares. La compañía adapta las bases de datos digitalizadas y la imagen de la Tierra sin nubes para su empleo en ordenadores personales y globos terráqueos de mesa. El pasado junio realizaron una demostración de su primer globo computarizado con disco láser en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro. Quieren, además, publicar programas interactivos similares en CD-ROM. Ambas versiones tendrán precios asequibles a escuelas y particulares: unas 10.000 pesetas.

Elemento clave del éxito de que goza GeoSphere Project es la imagen de la Tierra vista desde el espacio, limpia de nubes. Realizada en colaboración con el laboratorio de propulsión a chorro de la NASA en Pasadena, la imagen es un mosaico

inconsútil de cientos de imágenes de la Tierra, tomadas por los satélites TIROS-N de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Oceano (NOAA). La codificación en color de la información contenida en los casi 600 millones de píxeles de esta imagen requiere una capacidad de almacenamiento en disco duro de 2400 megabytes, y su máxima resolución —cuatro kilómetros— sólo podría proyectarse con tantos televisores como los que llenarían dos campos de fútbol. "Más ciencia de la que el artista querría, más arte de lo que el científico espera", sentencia Lloyd Van Warren, ingeniero de programación del laboratorio.

El equipo del laboratorio trabaja ahora en aumentar la resolución de la imagen hasta que sea sólo de un kilómetro. La de cuatro kilómetros, cuando se amplía el mar de Aral, revela claramente la grave merma que la irrigación le ha causado. Cuando se lleva la resolución hasta un kilómetro, surgen ya las explotaciones agrícolas que han medrado a expensas del mar.

No todo es tan alta tecnología. GeoSphere ha concedido licencia a dos fabricantes para que construyan globos terráqueos más corrientes, pero de nueva factura. Sus minigeoesferas mostrarán, claro está, la vista de la Tierra sin nubes propia de GeoSphere; pero superposiciones intercambiables hechas de material acrílico transparente representarán sobre ella las fronteras políticas, las rutas de migración de animales, los recursos energéticos o la distribución de la población.

GeoSphere trabaja, asimismo, en la adquisición de bases de datos, que va convirtiendo en representaciones visuales superponibles. Hasta ahora ha obtenido información procedente de más de 50 organizaciones internacionales, estadounidenses de rango federal y medioambientales, entre ellas el Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas, la NASA, la NOAA y el Instituto Worldwatch.

Muchas de las organizaciones colaboradoras reciben copias de los productos visuales ya terminados a cambio de sus costosos datos. Para otras, es suficiente recompensa que se divulgue su mensaje. "GeoSphere nos está ayudando a cumplir nuestra misión: que el público comprenda la información científica que recogemos", dice Douglas R. Newman, encargado de las relaciones de la NOAA con los ciudadanos. "Y quizá haya más de un niño en quien todo esto despierte las ganas de llegar a ser un científico."

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Poder electoral y voto proporcional

¿Un sistema electoral más justo, aunque en apariencia menos democrático?

La asamblea de Votanbloque acababa de efectuar el recuento de votos correspondiente al proyecto de ley Mordida-Pataunta. El presidente no estaba satisfecho.

"Penny, detesto perder una votación que tendríamos que haber ganado.

—Nadie le comprende mejor que yo, señor presidente —asintió Penélope, su secretaria.

—Me había usted garantizado que cuatro de las seis provincias nos eran favorables, incluido *Los Carrizos*, la mayor de todas.

—Cierto es, amado jefe.

—Entonces ¿por qué hemos perdido la votación?

—A causa del sistema de ponderación de los votos —explicó Penny—. Como bien sabe, a cada provincia le está asignada un número de votos que es aproximadamente proporcional a su población. *Los Carrizos* cuentan con 300.000 habitantes y poseen diez votos. Ahí está el mapa con todos los detalles. El total de votos es 31, con lo que toda coalición que reúna al menos 16 votos determinará el resultado del escrutinio.

Los Carrizos han votado a favor del proyecto, lo mismo que *Sexapil*, *Foinosa* y *Abrasat*. O sea, cuatro de las seis provincias. Pero en total sólo reúnen 15 votos. *Ricosmajos* y *Puchamés* han votado en contra, lo que suma 16 votos. Esa y no otra es la razón de que hayamos perdido."

El presidente Bolsilesa examinó los números con atención.

"Penny, las elecciones presidenciales tendrán lugar el mes que viene, y no tengo el deseo de sufrir otra derrota. ¿Y si solicitásemos de la Junta Electoral que conceda un voto más a *Los Carrizos* y uno menos a *Puchamés*?"

Penny negó con la cabeza.

"Yo no lo aconsejaría —dijo—. *Ricosmajos* y *Puchamés* pueden bloquear una coalición de los otros cuatro. Si se le retirase un voto a uno cualquiera de estas dos provincias, ya no sería así.

—Sí, desde luego. Pero, ¿por qué no...?

Llamaron a la puerta. El vano mostró el rostro enojado de Bolinero, diputado de *Abrasat*.

—Señor presidente *actual*. ¡Esta pantomima no puede seguir adelante!

—Tranquilícese usted, amigo Bolinero. ¿A qué pantomima se refiere?

—Me refiero, desde luego, a este sistema electoral suyo. ¡Con ese sistema de ponderación de los votos, *Abrasat* no tiene el más mínimo poder! ¡Y encima dicen que es democrático!"

El presidente dejó ver su desconcierto.

"No es como dice. Ustedes tienen derecho a un diputado, como les corresponde en proporción al número de habitantes. *Foinosa*, con una población algo mayor, tampoco tiene derecho a más de un escaño. En realidad, si bien se mira, tienen ustedes más poder.

—De ninguna manera, señor presidente en funciones. De eso, nada. *Abrasat*, lo mismo que *Foinosa*, carece por completo de poder. El resultado de cualquier votación quedará enteramente determinado por el sentido en que voten las tres provincias mayores. Y esto es así porque dos cualesquiera de ellos, reunidas, constituyen mayoría absoluta.

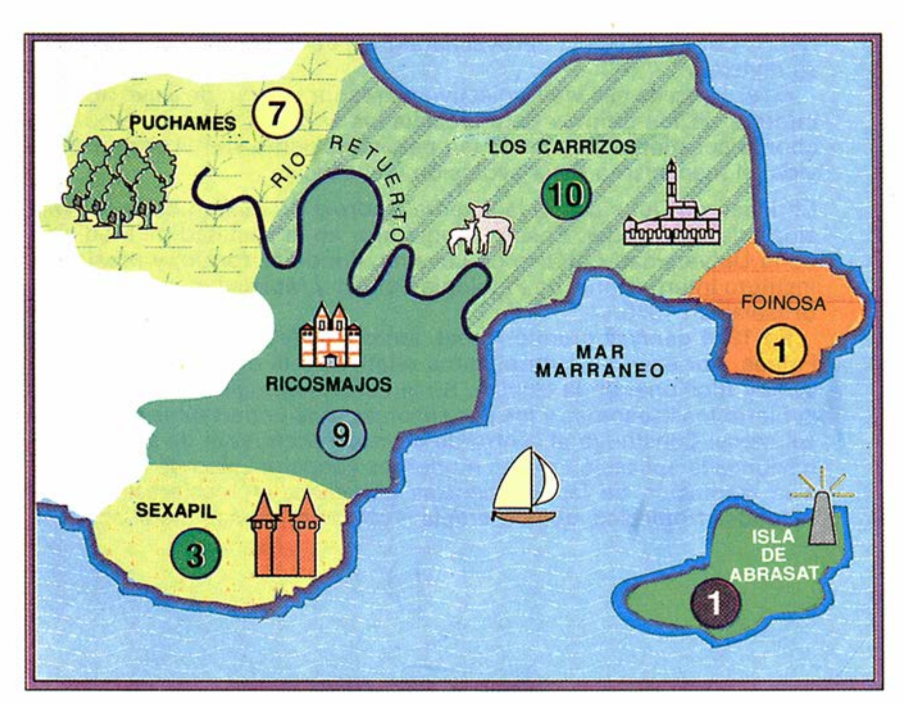
—Explíqueme eso, haga el favor.

—En toda votación, al menos dos de los tres provincias mayores habrán de votar lo mismo. La suma de sus votos será mayor o igual que la de los obtenidos por *Ricosmajos* y *Puchamés*, esto es, será por lo menos 16. Y eso es mayoría absoluta. ¡Es como si *Abrasat*, *Foinosa* y *Sexapil* carecieran por completo de representación! ¡Se lo repito: no tenemos el más mínimo poder!"

El presidente reflexionó sobre la objeción.

"Veo las razones de su enojo. ¿Qué esperan ustedes que haga yo?

—¡Concédanos un voto más! Entonces, las tres provincias pequeñas



1. Las seis provincias de Votanbloque. Los círculos indican su número de votos

podríamos unirnos a *Los Carrizos* para crear un voto de escisión. ¡Y si se le concediera un voto más a *Foinosa*, podríamos incluso formar una coalición mayoritaria!

—El número total de escaños sería 33, dijo Penny. Así, a partir de 17 se tendría mayoría absoluta. Una coalición de *Sexapil*, *Foinosa*, *Abrasat* y *Los Carrizos* podría imponer su opinión en la Cámara."

PROVINCIAS	VOTOS
LOS CARRIZOS	10
RICOSMAJOS	9
PUCHAMES	7
SEXAPIL	3
FOINOSA	2
ISLA DE ABRASAT	2

El presidente apartó la silla de su escritorio.

"Chema, ¿no podría Ordenación del Territorio reordenar las provincias de manera que a *Foinosa* y a *Abrasat* les correspondiera a cada una un escaño más?

Chema Andado, de la Comisión de Ordenación, negó con la cabeza.

"Podríamos hacer modificaciones en el caso de *Foinosa* —explicó—, pero *Abrasat* es una isla del mar Marráneo y dista 120 kilómetros del continente. ¡No resulta fácil modificar las fronteras sin que la gente se dé cuenta!

—No se hable más —suspiró el presidente.

—A mis electores no les va a hacer ninguna gracia —amenazó el diputado de *Abrasat*.

—¡No me cabe duda! Pero, como usted mismo ha tenido a bien explicarme, eso no tendrá efecto alguno sobre las votaciones, puesto que su provincia carece de poder —señaló el presidente—. No concedo mucha atención a las amenazas que no pueden surtir efecto, estimado Bolinero.

—Quizá prefiera que sólo tres de las seis provincias de Votanbloque puedan darle la patada.

—Una cuestión interesante, amigo Boli.

—Bolsilesa, es usted el presidente. Tiene usted la obligación de actuar."

El presidente examinó nuevamente los totales.

"Podríamos darles otros dos votos más a *Los Carrizos* —dijo el presidente—. La Comisión de Ordenación debería poder arreglar eso, ¿no es verdad, Chema?

—Desde luego, señor presidente. La frontera de la provincia sigue el curso del río Retuerto. Podríamos 'racionalizarla' sin dificultad.

—¡Pero darle dos votos más a la mayor de las provincias no contribuirá a darle parte del poder al más pequeño! —se lamentó el diputado de *Abrasat*.

—Me parece que se equivoca, dijo el presidente. Si *Los Carrizos* dispusieran de dos escaños más, ustedes tendrían parte del poder.

—La misma coalición, que de nuevo reúne a *Sexapil*, *Foinosa*, *Abrasat* y *Los Carrizos*, suma 17 de los 33 diputados; cada uno de las provincias más pequeñas dispone de un escaño que puede determinar la preponderancia."

Bolinero parecía intrigado.

"Es muy curioso, desde luego. Usted le concede mayor poder a *Los Carrizos* y, milagrosamente, ¿una parte de ese poder revierte en *Abrasat*?

PROVINCIAS	VOTOS
LOS CARRIZOS	12
RICOSMAJOS	9
PUCHAMES	7
SEXAPIL	3
FOINOSA	1
ISLA DE ABRASAT	1

—No, Boli, no es así —ironizó Penny—. No le hemos dado más poder a *Los Carrizos*, sino más votos. Y como usted mismo nos ha hecho notar, no se trata exactamente de lo mismo."

El presidente parecía entristecido.

"Por favor, Penny, le ruego que no insista. Sus palabras me causan gran consternación. Si el poder no reside en los votos, ¿en qué se encuentra? Es preciso que lo sepamos, porque es el poder quien hace ganar las elecciones... o perderlas. Quiero saber dónde reside el poder.

—¿Para qué, señor presidente? ¿Para saber a quién amenazar o a quién corromper? — azuzó Bolinero.

—Lo que hemos de saber —interrumpió Penny— es el índice de poder de Banzhaf.

—¿El qué? ¿De quién?

—John Banzhaf III era un jurista de la Universidad de Georgetown. Banzhaf propuso una nueva técnica de evaluación del poder de un representante (un diputado, un miembro de un consejo de administración) en un sistema de votación ponderada. La idea es que los representantes no pueden ejercer su poder sino de dos maneras: uniéndose a una coalición minoritaria para convertirla en mayoritaria, o abandonando una mayoría para ponerla en minoría.

—¿Y no es lo mismo? —terció, fastidiado, el presidente.

—Desde luego, señor. Cuando se entra en una coalición se abandona la formada por todos los demás. Basta, por lo tanto, considerar únicamente un caso, por ejemplo, la creación de una coalición mayoritaria. Un diputado desempeña un rol decisivo en una coalición si ésta es ganadora al contar con él pero queda en minoría si le pierde. El índice de poder de Banzhaf es el número de diferentes coaliciones en las que desempeña papel decisivo.

Con los pesos iniciales, nuestro sistema de votación constituye lo que se denomina un sistema {16; 10, 9, 7, 3, 3, 1, 1}. El número de votos necesarios para la mayoría es de por lo menos 16. *Abrasat* sólo desempeñaría papel decisivo en las coaliciones que totalizasen exactamente 16 votos. En las que sumasen más, *Abrasat* no modificaría nada si las abandonara, y en las que sumasen menos, su aportación no crearía una mayoría. Pero no existen coaliciones en las que figure *Abrasat* cuyo total de vo-

CASOS EN LOS CUALES EL VOTO DE LOS CARRIZOS RESULTA DECISIVO EN UN SISTEMA (17; 12, 9, 7, 3, 1, 1)
LOS CARRIZOS + PUCHAMES = 12 + 7 = 19
LOS CARRIZOS + RICOSMAJOS = 12 + 9 = 21
LOS CARRIZOS + PUCHAMES + ABRASAT = 12 + 7 + 1 = 20
LOS CARRIZOS + PUCHAMES + FOINOSA = 12 + 7 + 1 = 20
LOS CARRIZOS + RICOSMAJOS + FOINOSA = 12 + 9 + 1 = 22
LOS CARRIZOS + RICOSMAJOS + ABRASAT = 12 + 9 + 1 = 22
LOS CARRIZOS + PUCHAMES + SEXAPIL = 12 + 7 + 3 = 22
LOS CARRIZOS + RICOSMAJOS + SEXAPIL = 12 + 9 + 3 = 24
LOS CARRIZOS + RICOSMAJOS + PUCHAMES = 12 + 9 + 7 = 28
LOS CARRIZOS + SEXAPIL + FOINOSA + ABRASAT = 12 + 3 + 1 + 1 = 17
LOS CARRIZOS + PUCHAMES + FOINOSA + ABRASAT = 12 + 7 + 1 + 1 = 21
LOS CARRIZOS + RICOSMAJOS + FOINOSA + ABRASAT = 12 + 9 + 1 + 1 = 23
LOS CARRIZOS + PUCHAMES + SEXAPIL + FOINOSA = 12 + 7 + 3 + 1 = 23
LOS CARRIZOS + PUCHAMES + SEXAPIL + ABRASAT = 12 + 7 + 3 + 1 = 23
LOS CARRIZOS + RICOSMAJOS + SEXAPIL + FOINOSA = 12 + 9 + 3 + 1 = 25
LOS CARRIZOS + RICOSMAJOS + SEXAPIL + ABRASAT = 12 + 9 + 3 + 1 = 25
LOS CARRIZOS + PUCHAMES + SEXAPIL + FOINOSA + ABRASAT = 12 + 7 + 3 + 1 + 1 = 24
LOS CARRIZOS + RICOSMAJOS + SEXAPIL + FOINOSA + ABRASAT = 12 + 9 + 3 + 1 + 1 = 26

tos sea 16, de suerte que el índice de poder de *Abrasat* es 0.

—Ya he explicado que no tenemos ningún poder.

—¿Y con la nueva proposición del presidente? Imagino que se trata de un sistema de 34 votos: {17; 12, 9, 7, 3, 1, 1}.

—*Abrasat* desempeña un rol decisivo en toda coalición que la contenga y totalice 17 votos. Y hay sólo una: 12 + 3 + 1 + 1, correspondiente a *Los Carrizos*, *Sexapil*, *Foinosa* y *Abrasat*, con lo cual el índice de poder de *Abrasat* es 1.

—¿Y qué índice les corresponde a *Los Carrizos*?

—*Los Carrizos* disponen de 12 votos; por tanto desempeñan un papel decisivo en toda coalición que posea de 17 a 28 votos; 28, porque 28 = 17 – 1 + 12. Podríamos preparar una lista de estas coaliciones mediante cálculos razonados. Hay 18 de ellas, y por consiguiente el índice de poder de *Los Carrizos* es 18.

—Eso no es justo —dijo Boli—. ¡Su población no es más que 12 veces la nuestra, pero su poder es 18 veces superior!

—¡Lo cual es preferible a que tengan una población diez veces mayor que la suya, pero un poder infinitamente superior! —retrucó el presidente.

—¿Y no hay otra manera mejor de calcular el índice de poder que por tanteos? —quiso saber Chema.

—En el caso de un gran número de representantes o provincias resulta preferible utilizar un ordenador —dijo Penny—. De todos modos, en el caso de sistemas pequeños se dispone de un elegante método gráfico. Supongamos que el sistema sea (3; 2, 1, 1). En este caso hay tres votantes, *A*, *B*, *C*; *A* dispone de 2 votos, *B* y *C* disponen de uno cada uno, y hacen falta tres votos para tener la mayoría.

Dibujemos para empezar un diagrama que exhiba todas las coaliciones posibles (todos los subconjuntos de *A, B, C*) y unamos con un trazo aquéllas que se diferencien en un solo elemento. En el caso de tres miembros, este diagrama corresponde a un cubo. Rotulemos cada uno de estos lados por el elemento en que se diferencian sus extremos. Señalemos en rojo cada uno de los lados decisivos, donde el total de votos, que era al empezar inferior al de mayoría, le convierte en mayor o igual. El índice de poder de todo elemento dado es el número de lados decisivos que llevan su etiqueta. En este caso *A* aparece en tres lados decisivos y su índice de poder es igual a 3, mientras que *B* y *C* no figuran cada uno más que en un lado decisivo, por lo que el índice de poder de ambos es igual a 1.

Es posible dibujar diagramas correspondientes a mayor número de términos, pero rápidamente se tornan complicados. El de cuatro términos sigue siendo visualizable. Se trata de un hipercubo, o sea, un cubo en cuatro dimensiones."

El presidente se removió en su poltrona.

"Bueno, Bolinero, ¿qué opina?

—Me sentiría mucho más a gusto si el índice de poder de cada una de las provincias fuese directamente proporcional a su población —dijo éste.

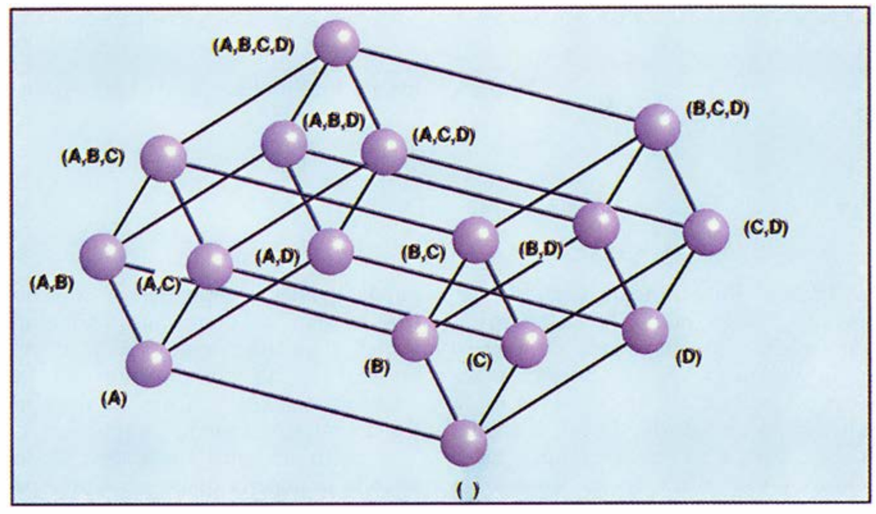
—Sería interesante, sí —dijo Penny—. Lo han intentado en los Estados Unidos, pero la ponderación óptima no es tan sencilla de calcular. Los números se hacen muy grandes y el ordenador tiene que ensayar una colección abrumadora de coaliciones... Para determinar tal ponderación se van incrementando a pasos sucesivos los números de votos otorgados a cada uno de los miembros, hasta que el número de basculaciones de resultados de votaciones por cambio de actitud de un miembro sea proporcional a su población.

Una idea grandiosa pasó por la cabeza de Bolsilesa. "¿Conoce usted el índice de poder del presidente de los Estados Unidos, Penny?

—Sí. El presidente de los Estados Unidos posee un índice de poder igual a 40 veces el de un senador y a 175 veces el de un miembro de la Cámara de Representantes.

	VOTOS	PODERES
A	2	3
B	1	1
C	1	1

2. Representaciones de los 2^n subconjuntos de un conjunto de n elementos (a). *Cada subconjunto consiste en una lista de los elementos que votan de igual manera, por ejemplo los que votan Sí en una consulta. Cada segmento está rotulado con el elemento que diferencia a los subconjuntos de sus extremos* (b). *El poder de un miembro es proporcional a los números de segmentos que hacen bascular el resultado de la votación* (c). *En este caso n = 3 y los poderes difieren de los números de votos*



3. El diagrama de un sistema de votación con cuatro votantes es un hipercubo, que posee 16 vértices. Este número es igual al de distintos subconjuntos de un conjunto con cuatro elementos

CONDADO DE TOMPKIMS				
PROVINCIAS	POBLACION	NUMERO DE VOTOS	INDICE DE PODER	COCIENTE PODER/POBLACION
Lansing	8317	404	4747	0,571
Dryden East	7604	333	4402	0,579
Enfield & Newfield	6776	306	3934	0,581
Ithaca Ward 3	6550	298	3806	0,581
Ithaca Ward 4	6002	274	3474	0,579
Ithaca South-East	5932	270	3418	0,576
Ithaca Ward 1	5630	261	3218	0,572
Ithaca Ward 2	5378	246	3094	0,575
Ithaca North-East	5235	241	3022	0,577
Groton	5213	240	3006	0,577
Caroline & Danby	5203	240	3006	0,578
Ithaca Ward 5	5172	238	2978	0,576
Uthaca West	4855	224	2798	0,576
Ulysses	4666	214	2666	0,571
Dryden West	4552	210	2622	0,576
TOTAL	87085			

4. Adaptación del número de votos de cada provincia y cálculo del índice de poder, de manera que este último sea proporcional a la población. En este caso la proporcionalidad está bien ajustada

—¡Qué sistema tan maravilloso!

—Por otra parte, el cuerpo legislativo tiene en su conjunto un poder más o menos igual a dos veces y media el del presidente."

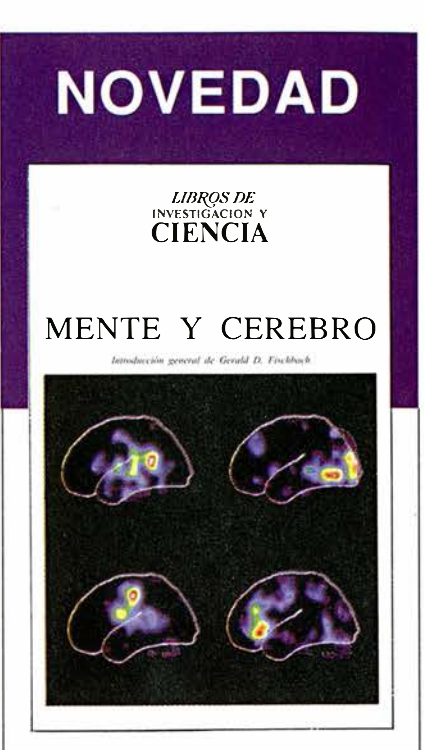
"Me parece que vamos a conservar el sistema actual —dijo el presidente—. Un sistema en el que habría que explicar todo eso al electorado me parece difícil de aplicar. Y, tal como andan las cosas, puedo salir sin plumas y cacareando."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GAME THEORY AND RELATED APPROACHES TO SOCIAL BEHAVIOUR. Martin Shubik, Wiley, Nueva York, 1964.

ONE MAN, 3,12... VOTES: A MATHEMATICAL ANALYSIS OF THE ELECTORAL COLLEGE. John F. Banzhaf III, en *Villanova Law Reviews*, n.º 13, págs. 304-346 y n.º 14, págs. 86-96, 1968.

FOR ALL PRACTICAL PURPOSES. Lynn Arthur Steen, W. H. Freeman, Nueva York, 1988.



Libros

Frederic Munné, Emilio Elizalde y Luis Alonso

Sociología

Manual universitario

SOCIOLOGIA, por Anthony Giddens. Alianza Editorial; Madrid, 1991.

Entre las reflexiones que este libro provoca al lector, está la de mostrarnos el nuevo escenario que el mundo ha estrenado con el advenimiento de la década de los noventa.

En circunstancias digamos normales, un libro traducido a los tres años de su edición original continúa siendo una obra reciente. Y en muchos aspectos el manual de Giddens ciertamente lo es. Ahora bien, al prevalecer en el texto el análisis de los problemas específicos sobre los planteamientos de carácter general, o sea lo empírico sobre lo teórico, se pone en evidencia el paso del tiempo.

En efecto, la edición original inglesa apareció en 1989, cuando el muro de Berlín aún no había sido derribado y la perestroika se estaba dibujando. Mucho y muy intensamente ha llovido desde entonces. Y si sería excesivo conceder a la caída del imperio soviético la importancia de la revolución francesa, no lo es tanto el afirmar que marca un hito en términos casi absolutos de antes y después. Los cambios estructurales que la nueva situación conlleva a nivel planetario son imprevisibles.

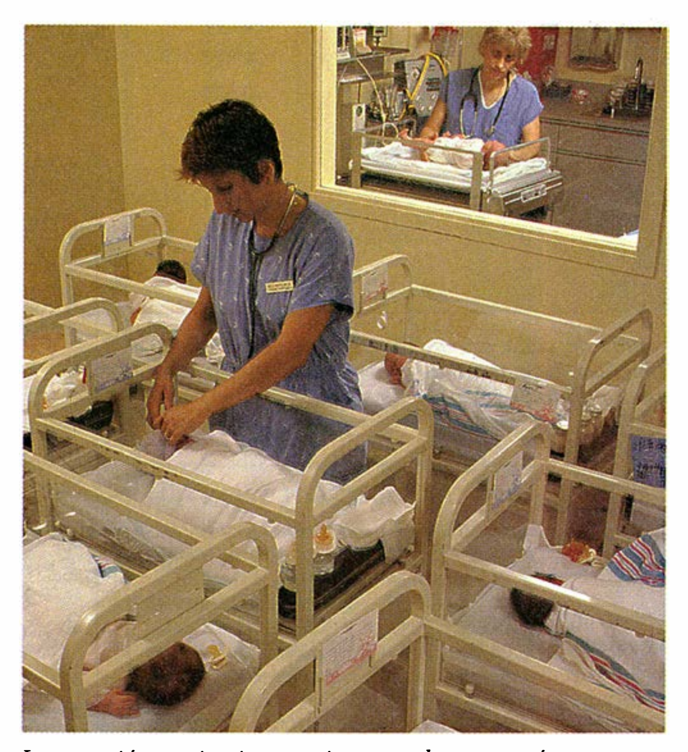
Donde más se revela este desfase es en los capítulos dedicados a la mundialización de la vida social y al pasado, presente y futuro del cambio social. Probablemente, hoy, en la época postURSS, ya pocos piensen, como aún escribe Giddens, que "la tarea de cómo limitar los riesgos de una confrontación nuclear es de cualquier manera la tarea más urgente que afrontará la humanidad en la década de 1990 y más allá". Sin que tal peligro haya desaparecido, la escala de urgencias ha variado sustancialmente. En el mismo sentido, viejos problemas como la degradación del medio, las divisiones de género y la violencia, ya no pueden plantearse simplemente en términos de la alternativa socialismo frente a capitalismo. En fin, a las dinámicas Este-Oeste y Norte-Sur se ha sumado la de la tríada formada por los EE.UU., el Japón y la "casa europea".

Todo esto podría llevarnos a la errónea conclusión de que estamos ante un libro desfasado. No es así. Justamente la anterior reflexión nos la provoca un autor de la vanguardia sociológica, que ha venido defendiendo la teoría del dualismo estructural, esto es, que el desarrollo y el cambio sociales son un producto de la constante realimentación entre las estructuras sociales y los agentes sociales. Lo que ocurre es que esta vez Giddens ha sido víctima de su propia teoría.

La sociología, afirma el autor en el prefacio, desempeña un papel clave en la cultura intelectual moderna y ocupa una posición central en las ciencias sociales. Para añadir, más adelante, que esta ciencia, que nos puede ayudar a entendernos a nosotros mismos así como nuestro mundo social, tiene una responsabilidad primordial en la comprensión de las transformaciones y líneas de desarrollo de nuestro mundo cambiante.

A partir de estos supuestos, se desarrolla la materia desde una doble posición, que de una parte es comparativa de las instituciones y sociedades, y de otra imprime una orientación histórica a la sociología. El capítulo inicial y los dos finales se reservan a la introducción general y a los métodos e historia respectivamente. El resto de la obra se estructura de acuerdo con los cánones habituales. Pero se concede una especial relevancia a las relaciones entre los géneros y a las interdependencias e integración entre las diversas sociedades del mundo. Y en muchos temas se abordan aspectos no usuales o a menudo descuidados. Así, cuando se estudia la interacción entre la cultura y el individuo, además de atender a la socialización, se piensa en el problema cada día más importante de la resocialización. Al tratar de la vida cotidiana se analizan los *lapsus* corporales y lingüísticos. Se conectan las cuestiones de la sexualidad con las del género. Al referirse a la estructura de poder, engloba en la misma la estratificación, las relaciones étnicas, los grupos y organizaciones, la política, la guerra y los militares. En las instituciones sociales, la educación es estrechamente relacionada con los medios de comunicación social. Y el cambio social es estudiado con el fenómeno de la mundialización de la vida social (especialmente en los aspectos económico y de los mencionados medios de comunicación), el urbanismo, la población, la salud y el envejecimiento, las revoluciones y los movimientos sociales.

Los principales problemas macrosociológicos están ya tratados desde una óptica actual. Se echa en falta el abordaje del papel



La atención sanitaria constituye un buen termómetro para medir el nivel de desarrollo de una sociedad

representado en nuestras sociedades por las nuevas tecnologías y el ocio o tiempo libre. (F. M.)

Métodos numéricos

Obra de consulta

MATHEMATICAL ANALYSIS AND NUMERICAL METHODS FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY. Dirigido por Robert Dautray y Jacques-Louis Lions. Springer Verlag; Berlín-Heidelberg, 1992.

Este libro es el quinto (*Evolution Problems I*) de una obra imprescindible en toda biblioteca científica, y casi me atrevería a decir personal. En su conjunto encontramos una coherente recopilación de métodos, con sus fundamentos, demostraciones y aplicaciones. Son sus destinatarios naturales no tanto los matemáticos puros cuanto los ingenieros, físicos, químicos y demás científicos interesados en el uso práctico de la matemática, en servirse de ella para resolver problemas específicos.

Los volúmenes 5 y 6 se ocupan de los problemas de evolución, es decir, problemas que dependen del tiempo. Son del tipo: $u'(x,t) + Au(x,t)$ (la ' indica derivada respecto a t), para x en cierta región y $t > 0$, y $u(t = 0) = u_0$ en dicha región, y con condiciones de contorno sobre u en la frontera de la misma, para $t > 0$.

Consta el volumen 5 de cinco capítulos. Empieza con el XIV de la secuencia general, en que se tratan los problemas de Cauchy típicos en R^n, asociados a la ecuación de difusión, a la ecuación de ondas y a la ecuación de Schrödinger.

En el capítulo XV se abunda en los mismos problemas, ahora en subdominios de R^n y por diagonalización del operador A (autoadjunto por hipótesis), es decir, haciendo uso de la descomposición espectral del mismo. Se plantean los casos de espectro discreto y espectro continuo y se van evaluando numerosas aplicaciones prácticas: difusión de neutrones, conducción del calor, cuerdas y membranas vibrantes, aplicaciones en elasticidad y el oscilador armónico cuántico. Este procedimiento espectral, también denominado método de Fourier, proporciona una expresión explícita de la solución en modos, aunque presupone que la descomposición espectral del operador A pueda llevarse a cabo cuando menos de forma numérica aproximada.

Se dedica el capítulo XVI al método de la transformada de Laplace, básico por sus aplicaciones en electrónica y telecomunicación, en robótica y sistemas de control. Se da en él un repaso a las transformadas de Laplace de distribuciones a valores vectoriales y se estudia el método en el caso de problemas de evolución de primer y de segundo orden. Proporciona también este método una expresión explícita de la solución, pero con el inconveniente (otra vez) de que no es siempre numéricamente calculable, problema que merece principal atención en el capítulo XVIII.

En el capítulo XVII se demuestra que, para una amplia clase de problemas, la solución puede escribirse en la forma: $u(t) = G(t)u_0$, donde $\{G(t)\}$ es una familia de operadores que dependen del tiempo y que constituyen un semigrupo, en el sentido de que $G(t + s) = G(t)\ G(s)$ para todo valor no negativo de t y s. Normalmente se simboliza $G(t) = e^{tA}$. Se estudian las propiedades de los semigrupos que actúan en un espacio de Banach, el concepto de generador infinitesimal de un semigrupo y el teorema de Hille-Yosida. Se tratan varios casos particulares de familias de operadores G: unitarios, compactos, diferenciables, holomórficos, contracciones, etc. El capítulo tiene toda una segunda parte consagrada a la resolución de problemas de Cauchy particulares con la técnica de semigrupos, en concreto la ecuación de Maxwell y la de Liouville-von Neumann, y termina con la fórmula de Trotter.

En el capítulo XVIII se estudian los métodos variacionales. Constituyen el procedimiento más sencillo de construcción de soluciones explícitas de los problemas aquí tratados, cuando el operador A depende explícitamente de t: $A(t)$, esto es, problemas con coeficientes dependientes del tiempo. No podemos apelar aquí ni al método de Laplace ni al de los semigrupos. Los métodos variacionales se extienden, a lo largo del tema, al tratamiento del caso más general: coeficientes que dependen de x y t, o sea, $A(x,t)$.

Además, se discuten en este capítulo final del volumen 5 algunos problemas nuevos; entre ellos, los de retardo, ecuaciones integro-diferenciales y problemas de control óptimo cuyas incógnitas son operadores, sentándose también las bases para el tratamiento de casos no lineales.

La presentación es excelente. Cada capítulo tiene su resumen al final del mismo. El libro sobrepasa las 700 páginas y ello hace difícil adentrarse en consideraciones muy específicas. En general puede decirse que la obra cumple los objetivos propuestos aunque, desde luego, no será de fácil asimilación por un físico, químico o ingeniero medio. La propia estructuración en proposiciones, teoremas, corolarios y observaciones, clasificados y numerados, incluso las demostraciones cuidadas, forman en muchos casos una primera barrera (si se quiere absurda o ficticia, pero barrera al fin y al cabo) que muchos de ellos no estarán dispuestos a derribar. Un físico-matemático, o ingeniero o químico con sólidos conocimientos matemáticos le puede, en cambio, sacar mucho provecho, ya sea desde un punto de vista más o menos estético o formal, para revisar nomenclaturas, conceptos y métodos que se van quedando arcaicos en su transmisión de generación en generación, o desde un punto de vista mucho más ambicioso de abordar problemas actuales de tratamiento difícil por procedimientos convencionales. Y es que hay que hacer notar que los autores del libro se preocupan de adaptar los recursos que nos brindan los ordenadores y, en particular, los métodos numéricos de cálculo propiciados por los mismos, a la expresión final de las soluciones de los problemas propuestos. (E. E.)

Ciencia medieval

Niveles de aproximación

THE BEGINNINGS OF WESTERN SCIENCE, por David C. Lindberg. The University of Chicago Press; Chicago, 1992.

THE OXFORD CALCULATORS AND THE MATHEMATICS OF MOTION 1320-1350, por Edith D. Sylla. Garland Publishing, Inc; Nueva York, 1991.

HEALING AND SOCIETY IN MEDIEVAL ENGLAND. A MIDDLE ENGLISH TRANSLATION OF THE PHARMACEUTICAL WRITINGS OF GILBERTUS ANGLICUS. Introducción y notas de Faye Marie Getz. The University of Wisconsin Press; Madison, 1991.

ALBERTUS MAGNUS. *DE VEGETABILIBUS VI, 2.* Edición y comentarios de Klaus Biewer. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart; Stuttgart, 1992.

David C. Lindberg es experto en historia de la ciencia medieval; *magister* le llamarían con propiedad, si levantaran cabeza, los historiados. Maestro en la exposición de los problemas y en el desanudamiento de las dificultades; en la interpretación de las fuentes, en la reconstrucción del escenario; en narrar con llaneza

lo que otros enredan en madejas krausistas. No existía, sepa el lector, ninguna introducción general digna de ese nombre a la ciencia creada desde los babilonios hasta el Humanismo. Ya la tenemos escrita, todavía en inglés pero es de presumir que muy pronto en español: *The Beginnings of Western Science. The European Scientific Tradition in Philosophical, Religious, and Institutional Context, 600 b.C. to a.D. 1450.*

Por tratarse de una obra didáctica, se muestra escrupuloso a la hora de mantener la proporción de los períodos y las disciplinas abordadas. Así como la profundidad. Da la impresión de que nos encontramos ante un especialista en matemática babilónica cuando describe la numeración sexagesimal, en teoría platónica del conocimiento a propósito del mito de la caverna o en enciclopedismo romano al llegar a Celso o Plinio. Sólo los muy sutiles percibirán su inclinación por las doctrinas físicas y cosmológicas de Aristóteles a los medievales. Por lo demás, no es suya la culpa si la historia de las disciplinas biológicas en esos mil años (agronomía, zoología y botánica) no han alcanzado el desarrollo experimentado en el campo de la astronomía o la medicina.

Flanquean el cuerpo del libro, en su arranque, una nota extensa sobre el concepto de ciencia, cuya precisión importa para saber qué tipo de conocimiento será objeto de estudio a lo largo de esos siglos, y, en su clausura, un ensayo sobre el carácter precursor o no del saber medieval respecto de la revolución científica del XVII.

En cada capítulo sitúa las figuras sobresalientes del momento en el contexto social, económico y político que permita entender la interpretación del movimiento de los cielos o el acto médico de acuerdo con la mentalidad de la gente de la época. Al historiador, recalca, no le compete ponderar el valor del saber de un tiempo con relación a la situación actual, sino desentrañar qué es lo que se pensaba, con qué medios se conseguía y cómo se expresaba. A veces los protagonistas no son las celebridades, sino las instituciones (erección de las universidades), determinados fenómenos (copistas monacales, introducción del nuevo Aristóteles en Occidente en el siglo XII) o las ideologías subyacentes (la ciencia y su relación con el Corán).

Una objeción quizá no menor: su generosa atención a la evolución de la historia de la ciencia en la España visigoda y en Al-Andalus habría ganado en algún matiz si Lindberg conociera el castellano y las obras escritas por nuestros investigadores, en particular las relativas al siglo XII.

El anillo de engarce de la filosofía natural medieval con la ciencia moderna está forjado, para los defensores de la continuidad, por los "calculadores de Oxford", tema de varias tesis doctorales como la fundamental del dominico James A. Weisheilp, defendida hace ya casi cuarenta años. *The Oxford Calculators and the Mathematics of Motion 1320-1350. Physics and Measurement by Latitudes* es el título de otra tesis, la de Edith D. Sylla, publicada veintiún años después en la colección de las disertaciones de Harvard, con un prefacio de autocrítica y puesta al día a través del repaso de sus investigaciones posteriores.

Aunque las referencias a la mecánica galileana son constantes a lo largo del texto, Sylla considera al grupo de Oxford en sí mismo, ciñéndose a una selección prieta de obras escritas en el segundo tercio del siglo XIV que aparecieron en el mismo entorno intelectual y parejo propósito, lo que no obstaba para que sostuvieran tesis dispares.

Nota distintiva de todos los "calculadores" era su aplicación a los problemas que exigían establecer los límites de las variables físicas (esto es, máximos y mínimos, instante inicial y final de un fenómeno o proceso), así como determinar las razones o proporciones matemáticas entre dos parámetros (velocidad y resistencia opuesta al movimiento). Este enfoque arranca con particular impulso de la obra de Thomas Bradwardine *De proportionibus* ("Sobre las razones de proporcionalidad"), de 1328, donde se demuestra la potencia de los métodos matemáticos.

El nombre del movimiento procede del texto más representativo, el *Liber Calculationum* ("Libro de los cálculos"), de Richard Swineshead, profesor del Colegio Merton oxoniense desde 1344 por lo menos. Con Richard integraban el grupo Roger Swineshead, Walter Burley, William Heytesbury, John Dumbleton, Richard Kilvington, Johannes Bode y el autor anónimo del *Tractatus de sex inconvenientibus*. Desde el punto de vista cronológico, de los cuatro estudiados por la autora Burley (y sus *Tractatus*) y Roger Swineshead (con sus *Descriptiones motuum*) inician la descripción cuantitativa del movimiento, más pormenorizada ya en la *Summa logicae et philosophiae naturalis* de Dumbleton y las *Calculationes* de Richard Swineshead.

No era exclusivo de los calculadores el estudio físico y metafísico del movimiento, ni los primeros en abordarlo, pero sí es central en ellos; no eran tampoco originales en el planteamiento del momento de la aparición y desaparición de las cualidades accidentales (la alteración o "sucesión de las formas" de la filosofía aristotélica). Lo que les caracteriza, sobre todo, es la matematización del movimiento, el cálculo de las distancias entre cualidades que puedan asimilarse a los intervalos espaciales (las *latitudes*), las razones de proporcionalidad y los grados.

El nivel de desarrollo matemático en que se mueven los calculadores no suele superar el elemental, habida cuenta de que de textos de clase o manuales para adolescentes en formación. De alcance, pues, general, aunque a veces se parte de una paradoja, un sofisma particular. Muestran también un carácter ancilar de los estudios teólogicos, médicos o jurídicos que vendrían luego. Sylla traza las líneas de pensamiento de fondo (nominalistas y realistas, lógica de las suposiciones), perfila cada autor en su obra, acota los puntos nucleares y deja abierta la prolongación de la tradición oxoniense. Subsana la dificultad de incluir las obras enteras con largos extractos de las mismas y agrega un útil diccionario terminológico que facilita la lectura a los alejados de un mundo que, en buena parte, no nos es familiar.

De cuantos científicos medievales tuvieron una vigencia perdurable durante siglos en otra área del saber, la farmacia, sobresalió, por su capacidad sistemática, Gilbertus Anglicus, cuyo *Compendium medicinae*, escrito en torno a 1250 y vertido al inglés medieval, estudia Faye Marie Getz en *Healing and Society in Medieval England*, refundición de su tesis doctoral.

Se trata de un recetario medicinal, un género abundantísimo lo mismo en la Europa insular que continental hasta el advenimiento de las farmacopeas nacionales. Son obras preferentemente de divulgación en lengua vernácula del saber académico para quienes no han podido pasar por las aulas o quieren disponer de un prontuario de enfermedades y remedios a mano, con pocas concesiones a la medicina popular.

Creíase que la naturaleza constituía una inmensa rebotica y que todo, de un modo u otro, estaba al servicio del hombre. Las cuatrocientas sustancias curativas aquí reunidas se limitaban a recoger un muestrario de tan ingente reservorio. Y los criterios de selección no eran otros que la tradición empírica y, en menor medida, su carácter simbólico. (De esta índole era el cartílago del corazón del ciervo recomendado para robustecer el corazón cansado del hombre.) Obvia-

mente, los ingredientes exóticos (ámbar, perlas, oro y plata), muy costosos, estaban reservados a los poderosos.

El principio activo de la farmacología medieval debe entenderse en el marco de la teoría humoral heredada de los griegos y transmitida al Occidente latino a través de los médicos árabes. (En síntesis dicha doctrina enseñaba que el cuerpo estaba formado por cuatro humores o fluidos —sangre, cólera, flema y melancolía— y cada humor tenía dos cualidades. La sangre era caliente y húmeda, la cólera caliente y seca, la flema fría y húmeda, y la melancolía fría y seca. La salud resultaba del perfecto equilibrio de esos humores y de sus cualidades. El desequilibrio producía la enfermedad y a restablecerlo se encaminaba la terapia.)

Acorde con la teoría galénica profesada por Gilbertus Anglicus, las enfermedades eran frías, calientes, húmedas o secas. Las "calientes" se atemperaban con remedios "fríos", es decir, mediante fármacos o dietas que ejercieran en el cuerpo el efecto contrario a la enfermedad. Y de acuerdo con esa acción, las drogas eran mitigantes, reforzantes, corrosivas, diuréticas y demás, administrándose en forma de píldoras, sahumerios, enemas, electuarios y supositorios.

El comercio de las drogas constituía un componente importante de la economía de los países durante la Edad Media. Se dictaron normas severas contra la adulteración de las mismas, de cuya aplicación cuidaban las autoridades de los propios gremios en que se agrupaban los boticarios.

Tras detallar todos esos aspectos de la medicina y famarcia de la Inglaterra tardomedieval, Getz se sumerge en el análisis pormenorizado de su aplicación en el manuscrito que transcribe: anatomía, fisiología, diagnóstico, terapéutica y preparación de las drogas. Compara después el "Gilbertus Anglicus" con los recetarios contemporáneos y la influencia del primero en los restantes, para llegar a un estudio erudito de las familias de manuscritos existentes y la razón de haber escogido ella el Wellcome 537. Pero su interés trasciende, y ésa es la razón de traerlo aquí, el ámbito cerrado de los medievalistas. El largo comentario textual, el glosario y los índices de plantas medicinales ayudarán a los alumnos de distintas facultades —filología, historia, biología y famarcia— a hacerse una idea más cabal del nivel científico de, por lo menos, los cuatro siglos inmediatamente anteriores a la revolución baconiana.

Avanzando un paso más en esta exposición de la ciencia del Medievo —comenzamos con una vista general, continuamos con un grupo o movimiento y acabamos de ver la difusión de una obra fundamental—, procede ocuparse de una parte de otro escrito significativo, el tratado segundo del libro sexto del *De vegetabilibus*, de Alberto de Colonia, preparado y anotado por Klaus Biewer.



Universidades medievales

En san Alberto (*circa* 1200-1280) se reconoce la figura que expresa el punto álgido de la historia natural en la Edad Media. Buen conocedor de la tradición árabe, que le mediatiza en bastante medida su dominio del mundo clásico, lleva a sus últimas consecuencias el enfoque empirista iniciado en el siglo XII. Escribió sobre física, mineralogía, zoología y botánica. Esta última, desde que en la centuria pasada la "redescubriera" Ernst Meyer (historiador, profesor y director del jardín botánico de Königsberg), ha llamado la atención de los especialistas, quienes han abordado, por lo común, algún aspecto general de su contenido.

El de Biewer es el primer estudio académico sobre un apartado del sexto de los sietes libros que conforman el *De vegetabilibus*, el que describe las "hierbas" por orden alfabético (el tratado primero se dedica a los "árboles"). Alberto lo redacta después del *De anima*, donde aborda los principios generales que explican la naturaleza y las operaciones de los seres vivos en cuanto tales; y ha dado a conocer también, entre otros, *De lapidibus* (mineralogía) y *Meteororum* (filosofía natural), puntos obligados de referencia para enmarcar las relaciones de los vegetales con el mundo mineral y el celeste.

De vegetabilibus es, en sus libros primero y cuarto, comentario del libro sobre las plantas que escribió Nicolás Damasceno, atribuido entonces a Aristóteles, opinión que hoy vuelve a admitirse en parte, aunque con datos de que Alberto no podía disponer (ni Biewer parece tener presente). Los cinco libros restantes constituyen una teoría y sistemática botánica que adquieren aplicación agronómica en el séptimo. Biewer añade una sobria introducción general y un documentado comentario *ad verba* al texto clásico de Meyer y Jessen. (L. A.)

Apuntes

El número de ingenios desplegados para ilustrar la dualidad onda-partícula está creciendo. Además de la doble rendija de Young, podíamos difractar los átomos a través de rejillas compuestas de ondas luminosas inmateriales o a través de rendijas formadas por otros átomos; ahora ya podemos difundir luz a partir de los dos átomos de un par suspendido en un vacío en un campo magnético.

Donde haya un buen dato observacional que se quiten todos los modelos. Ese parece ser el criterio por el que se guían los paleontólogos en su particular pugna con los paleoclimatólogos a propósito de la reconstrucción de los ecosistemas del pasado. A tenor de los modelos de simulación de circulación general habría una tendencia estacional en los paleoclimas continentales en una proporción que desmienten las observaciones de macrofloras y faunas fósiles.

La tesis oficial según la cual estratos de hierro oxidado de las formaciones férreas del Precámbrico darían fe de la primera manifestación del oxígeno libre en la atmósfera podría tambalearse si cobran fuerza las poblaciones bacterianas recién halladas. Se trata de bacterias púrpuras no sulfúreas que oxidan el Fe^{2+} en Fe^{3+} y reducen el CO_2 en materia celular. De ello cabe inferir que la oxidación biológica del hierro podría haber ocurrido antes de la aparición en la Tierra de la fotosíntesis oxigénica.

Las regiones de formación de estrellas en densas nebulosas moleculares ofrecen buen coto de caza para astrónomos y astrofísicos interesados en los fenómenos dinámicos exóticos. Hasta ahora, se atribuían esos fenómenos a la interacción entre el viento procedente de estrellas jóvenes y el material circundante a la nube. La consecución de fotografías espectaculares en el infrarrojo de regiones activas de formación de estrellas en la nebulosa de Orión ha puesto de manifiesto el interior profundo de la misma y, con ello, estructuras explosivas que podrían ser las culpables reales de los fenómenos dinámicos.

¿Qué respuesta geométrica da la proteína globular a la mutación que le obliga a incorporar un nuevo aminoácido en su hélice, por ejemplo, el mutante Catonsville, que supone la agregación de un glutamato en la hélice C? Caben dos soluciones: que los extremos deshagan su giro para admitir el residuo intruso o que la hélice se abombe. Ocurre lo segundo. La observación de este fenómeno sugiere a los bioquímicos que quizá sea ese el mecanismo general que se adopte en los casos de inserción o deleción.

Una nueva manera de zanjar las discusiones científicas nace, y con ella una peculiar manera de gastar el dinero de otros. Un alto cargo de la Sociedad Astronómica Americana ha aconsejado a sus asociados que no aireen en público sus disensiones acerca del proyecto de grandes telescopios Gemini. Un informe considera inadecuado que los espejos sean de menisco delgado. Aunque financieramente ello sería ventajoso a corto plazo, son menos fiables que los de panal de borosilicato. Pero estas dudas podrían mover al Congreso de los EE.UU. a denegar los necesarios fondos... A callar, pues, tocan.

Ni ahora ni antes estaban las medicinas caras al alcance de todos. Para curar la disentería y las varices que padecía el rey de Inglaterra Eduardo I los fármacos recetados por el médico áulico procedían de la famosa botica de Ricardo de Montpellier. La receta era, obviamente, regia: un electuario de ámbar gris, almizcle, perlas, oro y plata; azúcar de rosas; vino de granado, y emplasto de ámbar gris con resinas exóticas. La factura, que ascendía a 134 libras de entonces (1307), no se llegó a cobrar nunca, pues tales remedios no enderezaron la salud del monarca.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA VIDA Y LA MUERTE COMO INDICADORES ECONOMICOS, por Amartya Sen

Los índices de mortalidad, cuando vienen en auxilio del análisis de los logros económicos, permiten aclarar aspectos críticos de la organización de la sociedad.

FRONTERA ENTRE EL MANTO Y EL NUCLEO, por Raymond Jeanloz y Thorne Lay

Esa zona de interacción podría constituir la parte de mayor dinamismo del planeta, condicionando su movimiento de rotacíon y el campo magnético terrestre.

P. A. M. DIRAC Y LA BELLEZA DE LA FISICA, por R. Corby Hovis y Helge Kragh

Prefería la teoría bella a la corroborada con hechos pero fea, porque, advertía, los hechos cambian. Ello le llevó a predecir la existencia de antimateria.

LA QUITINA, por José Ruiz Herrera

El segundo compuesto orgánico más abundante en la Tierra es un polisacárido lineal que imparte rigidez a la pared celular de los hongos y al exoequeleto de un gran número de invertebrados.

COSMOS INCONSTANTE, por Corey S. Powell

Telescopios situados en el espacio y dotados con visión de rayos X y de rayos gamma observan un universo dinámico, nunca en reposo.

EL PODER DE LOS MAPAS, por Denis Wood

La rotunda apariencia de los mapas modernos puede enmascarar la finalidad con que fueron elaborados. La comprensión de las limitaciones subjetivas de los mapas es esencial para hacer un uso inteligente de las informaciones que contienen.

NEUROBIOLOGIA DEL MIEDO, por Ned H. Kalin

Los científicos comienzan a desentrañar los procesos neuroquímicos que dan lugar a diferentes tipos de miedo en el mono. Los resultados pueden conducir al desarrollo de nuevos tratamientos de la ansiedad en el hombre.

RESPUESTA DE LAS CELULAS AL ESTRES, por William J. Welch

En situaciones de emergencia, las células sintetizan proteínas que reparan los daños sufridos. La investigación del mecanismo a través del cual operan esas proteínas del estrés ha llamado la atención por sus connotaciones con los procesos inflamatorios, las enfermedades autoinmunitarias y el cáncer.

